

Mario Sonderrmann

**Mechanische Verbindungen zum Aufbau
optischer Hochleistungssysteme**

Berichte aus dem
INSTITUT FÜR MASCHINEN- UND
GERÄTEKONSTRUKTION (IMGK)

Herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin (Maschinenelemente),

Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska (Feinwerktechnik) und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber (Konstruktionstechnik)

aus dem Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK) an
der TU Ilmenau.

Band 19

Diese Reihe setzt die „Berichte aus dem Institut für
Maschinenelemente und Konstruktion“ fort.

Mechanische Verbindungen zum Aufbau optischer Hochleistungssysteme

Mario Sondermann



Universitätsverlag Ilmenau
2011

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 8. Juli 2010

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing René Theska
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Dr. rer. nat. Georg Günther
(Carl Zeiss Jena GmbH)

3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Bliedtner
(Fachhochschule Jena)

Tag der Verteidigung: 17. Dezember 2010

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

Satz

text plus form, Dresden

www.text-plus-form.de

ISSN 2191-8082 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-939473-94-7 (Druckausgabe)

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2010000489](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2010000489)

Geleitwort der Herausgeber

Die Konstruktion von Maschinen und Geräten sowie die zugehörigen Methoden und Werkzeuge sind seit den frühen 1950er Jahren ein profilbildender Schwerpunkt an der Technischen Universität Ilmenau und ihren Vorgängereinstitutionen. Es war daher ein nahe liegender Schritt, dass die drei konstruktiv orientierten Fachgebiete der Fakultät für Maschinenbau – Maschinenelemente, Feinwerktechnik/Precision Engineering, Konstruktionstechnik – im Mai 2008 das Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK) neu gegründet haben. Das IMGK steht in der Tradition einer Kette ähnlicher Vorgängereinstitute, deren wechselnde Zusammensetzung hauptsächlich durch sich über der Zeit ändernde Universitätsstrukturen bedingt war.

Zweck des Institutes ist es, die Kompetenzen und Ressourcen der beteiligten Fachgebiete zu bündeln, um Forschung und Lehre zu verbessern und erzielte wissenschaftliche Ergebnisse gemeinsam in die Fachöffentlichkeit zu tragen.

Ein wesentliches Instrument hierzu ist die Schriftenreihe des Instituts für Maschinen- und Gerätekonstruktion. Sie führt eine erfolgreiche Schriftenreihe des im Jahr 1991 gegründeten unmittelbaren Vorgängereinstitutes IMK (Institut für Maschinenelemente und Konstruktion) fort.

In der Schriftenreihe erscheinen in erster Linie die am Institut entstandenen Dissertationen, daneben werden aber auch andere Forschungsberichte, die in den thematischen Rahmen passen und von allgemeinem Interesse sind, in die Schriftenreihe aufgenommen.

Der vorliegende Band 19 ist als Dissertation am Fachgebiet Feinwerktechnik/Precision Engineering unter der wissenschaftlichen Betreuung von Professor René Theska entstanden.

Die Herausgeber wünschen sich reges Interesse an der Schriftenreihe und würden sich freuen, wenn sie zum fruchtbaren Dialog in Wissenschaft und Praxis beitragen würde.

Ilmenau, im Januar 2011

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin (Maschinenelemente)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska (Feinwerktechnik)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber (Konstruktionstechnik)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist die überarbeitete Fassung meiner Dissertation, die in engem Bezug zu meiner Tätigkeit im Technologiezentrum der Carl Zeiss Jena GmbH und in Zusammenarbeit mit dem Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion der Technischen Universität Ilmenau entstand. Für die Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich deshalb zuerst bei den Verantwortlichen der Carl Zeiss Jena GmbH und dem Leiter des Instituts für Maschinen- und Gerätekonstruktion, Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska, bedanken.

Darüber hinaus danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska für die wissenschaftliche Betreuung meiner Dissertation. Mit großem Interesse unterstützte er mein Vorhaben in einer Vielzahl konstruktiver Diskussionen und durch die kritische Durchsicht des Manuskripts. Insbesondere fand ich in ihm einen Mentor, der durch seine Anregungen meine Entwicklung auch über die vorliegende Arbeit hinaus förderte.

Dr. rer. nat. Georg Günther, dem Leiter der Arbeitsgruppe Technologie Optiksysteme der Carl Zeiss Jena GmbH, danke ich für die Unterstützung meines Promotionsvorhabens. Er gab mir die Möglichkeit, innerhalb seiner Gruppe anspruchsvolle Themen zu bearbeiten, und unterstützte meine berufliche und persönliche Entwicklung in vielerlei Hinsicht.

Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr. Ing. Jens Bliedtner für das Interesse, für wertvolle Hinweise bei der Überarbeitung des Manuskripts und für die Übernahme eines Gutachtens bedanken.

Mein Dank für die vertrauensvolle und freundschaftliche Zusammenarbeit gilt den Mitarbeitern der Carl Zeiss Jena GmbH. Besonders erwähnen möchte ich Dr. Ing. Eckhard Roth und Dr. Ing. Stefan Frank.

Von Herzen danke ich meinen Eltern für dauerhaften Rückhalt, den ich bei ihnen immer fand und finde. Weiterhin möchte ich meine Großeltern nicht

unerwähnt lassen, die mir mit ihrer Herzlichkeit, ihrer Bescheidenheit und ihrem Fleiß immer Vorbild waren. Meiner Frau Susanne danke ich für Geduld, Verständnis und eine Vielzahl aufmunternder Worte im Rahmen der Fertigstellung dieser Arbeit.

Jena, im Januar 2011

Mario Sondermann

Kurzfassung

Optische Technologien gelten als Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Eine Vielzahl bestehender und zukünftiger Anwendungen von Licht setzt hoch entwickelte optische Systeme voraus. Ein allgemeiner Trend bei der Neu- und Weiterentwicklung optischer Systeme ist die Steigerung ihrer Leistungsfähigkeit, beispielsweise in Form einer höheren Abbildungsqualität. Diese wird zum einen durch die physikalische Auslegung der Systeme und zum anderen durch die Möglichkeiten der technischen Realisierung bestimmt. Im Rahmen der technischen Realisierung ist eine enge Verknüpfung von konstruktiver Gestaltung und technologischer Umsetzung notwendig.

Eine spezielle Gruppe der optischen Systeme sind optische Hochleistungssysteme, wie sie beispielsweise in optischen Systemen zur Masken- und Waferinspektion, in der hochauflösenden Mikroskopie oder in speziellen Laseranwendungen eingesetzt werden. Zukünftige und zum Teil bereits aktuelle Anforderungen an derartige Systeme können mit bestehenden Möglichkeiten der technischen Realisierung nicht mehr sicher erfüllt werden. Hieraus leitet sich ein zunehmender Bedarf hinsichtlich technologischer und konstruktiver Weiterentwicklung ab. Im Rahmen der konstruktiven Gestaltung optischer Systeme spielen mechanische Verbindungen eine zentrale Rolle. Von besonderer Bedeutung sind die Verbindung optischer Bauelemente mit mechanischen Fassungen sowie die Verbindung gefasster optischer Bauelemente zu Systemen höherer Komplexität, beispielsweise Objektiven.

Ziel dieser Arbeit ist es, den aktuellen Entwicklungsstand bei der Umsetzung dieser Verbindungsaufgaben darzustellen und Möglichkeiten für dessen Weiterentwicklung zu erarbeiten. Hierzu wird das Arbeitsfeld begrifflich und inhaltlich abgegrenzt. Mithilfe einer Betrachtung der Herstellung und Anwendung optischer Hochleistungssysteme werden Anforderungen für deren Weiterentwicklung abgeleitet. Für die Realisierung der gegebenen Verbindungs-

aufgaben werden systematisch Lösungsräume und Methoden erarbeitet und anschließend hinsichtlich der Erfüllung der gegebenen Anforderungen untersucht und bewertet.

Unter methodischen Gesichtspunkten stellt diese Arbeit Vorgehensweisen zur zielgerichteten Entwicklung von festen mechanischen Verbindungen in optischen Systemen vor. Die Anwendbarkeit dieser Vorgehensweise wird durch praktische Ergebnisse bestätigt.

Abstract

Optical technologies are considered one of the key technologies in the 21st Century. A multiplicity of current and future applications of light requires highly-developed optical systems. A general trend in the new and further development of optical systems is to increase their performance, for example, in the form of a higher image quality. On the one hand this is determined by the physical design layout of systems and on the other hand by the possibilities of technical realization. As part of the technical realization a close link between constructive design and technology implementation is necessary.

Optical high-performance systems are a special group of optical systems, such as those used, for example, in optical systems for mask and wafer inspection, in high-resolution microscopy, or in specific laser applications. Future and partly current requirements for such systems can not be safely met with the existing possibilities of technical realization. From this follows that there is a growing need for technological and constructive development. As part of the structural design of optical systems, the mounting of optical components with mechanical elements, for instance lens mounts, and the connection of mounted optical components to more complex systems, such as objectives, take a central role.

The aim of this paper is to show the current state of development on the implementation of these mounting applications and to methodically develop opportunities for its enhancement.

For this, the field of work is defined in terms of concept and content. Using a consideration of the manufacturing and application of optical high performance systems, requirements are derived for their further development. In order to realize these requirements solution spaces and methods have been systematically developed and then analyzed to fulfil the given requirements.

From a methodological aspect this work presents approaches for the purposive development of mechanical connections in optical systems. The applicability of these approaches is confirmed by practical results.

Inhalt

Geleitwort der Herausgeber	V
Vorwort	VII
Kurzfassung	IX
Abstract	XI
Häufige Abkürzungen und Formelzeichen	XV
1 Einleitung	1
2 Zielstellung und Aufbau	3
3 Abgrenzung des Bearbeitungsfeldes	5
3.1 Begriffe	5
3.2 Klassifizierung	9
4 Mechanische Verbindungen	13
4.1 Einführung und Begriffe	13
4.2 Aufbau fester mechanischer Verbindungen	16
4.3 Koppelstellen fester mechanischer Verbindungen	17
4.4 Sicherung mechanischer Verbindungen	24
4.5 Kombination von Koppelstellen und Sicherung	28
4.6 Zusammenfassung	31
5 Herstellung und Anwendung von OHS kleiner Durchmesser	33
5.1 Herstellung	33
5.2 Hintergrund – Objektive für die Masken- und Waferinspektion	39
5.3 Anforderungen	40
6 Unmittelbare Fassungstechnik	45
6.1 Einführung	45
6.2 Methodische Analyse	49

6.3	Stand der Technik	53
6.4	Lösungsraum	57
6.4.1	Einführung	57
6.4.2	Aufbau der mechanischen Schnittstelle	59
6.4.3	Sicherung der Verbindung	60
6.4.4	Anwendung feinwerktechnischer Konstruktionsprinzipien	72
6.4.5	Zusammenfassung	84
6.5	Statisch bestimmte Fassungstechnik	86
6.5.1	Einführung	86
6.5.2	Formulierung der Konstruktionsaufgabe	87
6.5.3	Konzept	87
6.5.4	Analytische Untersuchungen	90
6.5.5	Konstruktionsentwurf	97
6.5.6	Funktionsnachweis	102
6.6	Zusammenfassung und Bewertung	109
7	Mittelbare Fassungstechnik	111
7.1	Einführung	111
7.2	Stand der Technik	112
7.3	Anforderungen	117
7.4	Lösungsraum	117
7.5	Stapelfassung	119
7.5.1	Einführung	119
7.5.2	Technologische Untersuchungen	121
7.5.3	Toleranzbetrachtung	131
7.5.4	Konstruktive Untersuchungen	135
7.6	Zusammenfassung und Bewertung	138
8	Zusammenfassung und Ausblick	141
	Literaturverzeichnis	147
	Abbildungsverzeichnis	155
	Tabellenverzeichnis	158
	Sachwortverzeichnis	159
	Anhang	161

Häufige Abkürzungen und Formelzeichen

Lateinische Großbuchstaben

A	Ausgangsgrößen
CaF_2	Calciumfluorid
CCP	Computer controlled polishing (computergesteuertes Polieren)
DUV	deep ultraviolet (Wellenlängenbereich von 130 nm bis 300 nm)
E	Eingangsgrößen
EUV	extrem ultraviolett (Wellenlängenbereich von 10 nm bis 121 nm)
F	Freiheitsgrad
F_{A_i}	Kraft im Lager A_i
F_{Ein}	Kraft für Einstellbewegung
F_G	Gewichtskraft
F_N	Normalkraft
F_R	Reaktionskraft
F_{Reib}	Reibkraft
F_S	Sicherungskraft
F_{TP}	bei Transport auftretende Kraft
F_V	Vorspannkraft
F_Z	Zusatzkraft
HLO	Hochleistungsoptik
IBF	Ion Beam Figuring (Ionenstrahlbearbeitung)
KS	Koppelstelle
OHB	optisches Hochleistungsbauelement
OHS	optisches Hochleistungssystem
RFK	relative Flächenkipfung
SDB	Spannungsdoppelbrechung
SiO_2	Quarzglas (Fused Silica)
SR	Strehlsche Definitionshelligkeit
T	Temperatur

T_0	Bezugstemperatur
T_i	Toleranz der Einzelgröße i
T_w	Wahrscheinlichkeitstheoretische Summentoleranz
UV	ultraviolett (Wellenlängenbereich von 10 nm bis 400 nm)

Lateinische Kleinbuchstaben

a_{Tp}	bei Transport auftretende Beschleunigung
c	Federsteifigkeit
e	Stoßfaktor
f	Freiheit der Bewegung
g	Normfallbeschleunigung
m	Masse
m_{oBE}	Masse des optischen Bauelementes
n	Anzahl
pv	peak to valley, Abweichung optischer Wirkflächen von ihrer Idealform
r_n	Krümmungsradius der Fläche n
s	Länge
s_f	Sicherheitsfaktor
u	Unfreiheit – gesperrte Freiheit der Bewegung
\ddot{u}	Überbestimmtheit
$v1, v1', v2, v2'$	Geschwindigkeit Stößel/Bewegungselement vor/nach Stoß

Griechische Buchstaben

a	Wärmeausdehnungskoeffizient
$2a$	Öffnungswinkel V-Nut
Δ	Änderung
e	Kippwinkel
λ	Wellenlänge des Lichts
μ	Reibkoeffizient
μ_H	Haftreibungskoeffizient
ϱ	Reibwinkel

1 Einleitung

Optische Technologien umfassen die Gesamtheit physikalischer, chemischer und biologischer Naturgesetze und Technologien zur Erzeugung, Verstärkung, Formung, Übertragung, Messung und Nutzbarmachung von Licht [Lenk00]. Sie sind Grundlage und Schrittmacher für eine Vielzahl technologischer Entwicklungen und Anwendungen [BMBF02]. Bis zum Jahr 2015 wird im Bereich der optischen Technologien ein Anwachsen des weltweiten Produktionsvolumens auf 439 Mrd. EUR erwartet. Das durchschnittliche jährliche Wachstum von 7,6 % liegt damit deutlich über dem Weltwirtschaftswachstum und weist die optischen Technologien als Wachstumsbranche aus [BMBF07], [Photo09], [Photo10]. In Deutschland hängen schon heute etwa 16 % der Arbeitsplätze im verarbeitenden Gewerbe mittelbar oder unmittelbar von den optischen Technologien ab. Dies entspricht etwa einer Million Beschäftigter [Baye05]. Allgemein lässt sich feststellen, dass die wirtschaftliche Bedeutung der optischen Technologien stetig wächst. Die Basis für dieses Wachstum bildet die Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf diesem Gebiet.

Einen technisch höchst anspruchsvollen Einsatzbereich der optischen Technologien bildet die Produktionstechnik mit dem Industriezweig der Halbleiterindustrie. Zur Realisierung immer leistungsfähigerer Halbleiterbauelemente unterliegen die Strukturen auf diesen Bauelementen einer stetigen Miniaturisierung. Zur Produktion derartiger Bauelemente kommen in Produktionsanlagen der Halbleiterindustrie optische Systeme höchster Leistungsfähigkeit zum Einsatz. Besondere Merkmale dieser Systeme sind auf der einen Seite ihre beugungsbegrenzte Auslegung und technische Ausführung sowie auf der anderen Seite ihre geometrische Gestalt. Diese ist gekennzeichnet durch optische Bauelemente mittleren und großen Durchmessers, die in komplexen optisch-mechanischen Baugruppen mit höchster Genauigkeit zu einem Gesamtsystem gefügt werden. Der wirtschaftliche Einsatz derartiger Systeme unter realen

Produktionsbedingungen wird erst durch die intensive wissenschaftliche Auseinandersetzung mit allen Themenkomplexen entlang des Produktlebenszyklus möglich. Die im Bereich der optischen Systeme für die Halbleiterproduktion bereits weit vorangeschrittene wissenschaftliche Durchdringung, an deren Ende ein extrem leistungsfähiges Produkt steht, hat in anderen Anwendungsfeldern erst begonnen. Als Beispiel hierfür seien sowohl die optischen Systeme für die Qualitätskontrolle innerhalb der Halbleiterindustrie als auch optische Systeme für die hochauflösende Mikroskopie genannt. Diese Systeme, die unter Verwendung optischer Bauelemente kleiner Durchmesser aufgebaut sind, werden zunehmend zum Gegenstand wissenschaftlicher Aufgabenstellungen. Die steigenden Anforderungen an die Abbildungsleistung derartiger Systeme, in Kombination mit teilweise sehr kleinen Arbeitswellenlängen, können mit bestehenden Fassungs- und Montagetechniken nicht mehr prozesssicher realisiert werden. Ein Anliegen der Vorliegenden Arbeit ist es deshalb, die im Wesentlichen durch Arbeiten aus den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts gekennzeichnete Fassungstechnik für optische Hochleistungssysteme kleiner Durchmesser in ihrem aktuellen Entwicklungsstand darzustellen und systematisch Ansätze für ihre Weiterentwicklung abzuleiten.

2 Zielstellung und Aufbau

[Fran08] beschreibt eine zunehmende Diskrepanz zwischen den kontinuierlich steigenden Anforderungen an optische Systeme und dem, was mit der verfügbaren Fertigungs- und Montagetechnologie umgesetzt werden kann. Deshalb sind verstärkt Anstrengungen zur technologischen Weiterentwicklung von Teilschritten wie beispielsweise dem Justierdrehen und der rechnergestützten Montage zu verzeichnen. Dies wird durch Veröffentlichungen wie [Fran08], [Fisch00], [Sure06], [Jahr04] belegt. Neben dem Ausbau der technologischen Möglichkeiten zeichnet sich ein Bedarf hinsichtlich der Weiterentwicklung des konstruktiven Aufbaus optischer Systeme ab. Wesentliche Elemente im konstruktiven Aufbau sind die Verbindung optischer Bauelemente mit mechanischen Fassungen sowie die Verbindung gefasster optischer Bauelemente zu Komponenten und Systemen.

Ziel dieser Arbeit ist es, den aktuellen Entwicklungsstand bei der Umsetzung dieser Verbindungsaufgaben darzustellen und Möglichkeiten für dessen Weiterentwicklung zu erarbeiten.

Als Basis für die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Thematik wird in Kapitel 3 eine Einführung zentraler Begriffe sowie eine Abgrenzung des Bearbeitungsfeldes vorgenommen. In Kapitel 4 erfolgt eine Betrachtung von Aufbau und Eigenschaften mechanischer Verbindungen. Kapitel 5 hat die Herstellung optischer Hochleistungssysteme und die Anforderungen hinsichtlich ihres konstruktiven Aufbaus zum Inhalt. Die Kapitel 4 und 5 bilden die Grundlage für die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Thematik. In diesen Abschnitten werden aktuelle Betrachtungsweisen genutzt und aus ihnen Thesen für die inhaltliche Bearbeitung abgeleitet. In Kapitel 6 erfolgt die Anwendung dieser Thesen auf die Verbindung optischer Bauelemente mit einer mechanischen Fassung. Dazu wird der aktuelle Stand der Technik dargestellt und analysiert. Darauf folgt eine systematische Erarbeitung eines Lösungsrau-

mes für die Gestaltung dieser speziellen Verbindung sowie deren exemplarische Anwendung. Als Teil dieser Anwendung werden analytische, konstruktive und experimentelle Untersuchungen vorgestellt und bewertet. In Kapitel 7 erfolgt die Anwendung der Thesen auf den Aufbau optischer Komponenten. Nach der Analyse des Standes der Technik werden hier Anforderungen für dessen Weiterentwicklung abgeleitet und deren Umsetzung vorgestellt.

Abschließend erfolgt in Kapitel 8 der Arbeit eine Zusammenfassung und Bewertung der erzielten Ergebnisse unter zwei Gesichtspunkten. Aus methodischer Sicht werden die im Rahmen der Arbeit getroffenen Aussagen und vorgeschlagenen Vorgehensweisen hinsichtlich ihrer Eignung für die Weiterentwicklung fester Verbindungen mit speziellen Anforderungen diskutiert. Aus praktischer Sicht erfolgt eine Bewertung der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten konstruktiven Lösungen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für den Einsatz in optischen Hochleistungssystemen.

3 Abgrenzung des Bearbeitungsfeldes

3.1 Begriffe

Eine wissenschaftliche Ausarbeitung behandelt einen Gegenstand der Betrachtung, welcher so genau umrissen wird, dass er auch für Dritte erkennbar ist [Eco88]. Um dieser Grundforderung des wissenschaftlichen Arbeitens gerecht zu werden, erfolgt im Anschluss zum einen eine Einführung zentraler Begriffe und zum anderen die Abgrenzung des durch die Aufgabenstellung gegebenen Bearbeitungsfeldes. Besonderes Augenmerk liegt auf der Begriffsdefinition zur Fassungstechnik.

Im Bereich der optischen Technologien und der Feinwerktechnik ist der Begriff Fassen für das Verbinden einer Linse mit einer Fassung allgemein bekannt. Auch eine Verwendung des Begriffs für die Verbindung anderer optischer Bauelemente, beispielsweise von Spiegeln oder Prismen mit mechanischen Bauelementen, ist üblich. Weiterhin ist eine Verwendung für die Verbindung feinmechanischer Bauelemente ohne optische Wirkung, beispielsweise von Tastspitzen und Skalen von Messgeräten mit Halterungen oder Gestellen, anzutreffen. Verallgemeinern lässt sich aus der Verwendung des Begriffs nur die Erzeugung einer Verbindung mit besonderen Anforderungen. Welcher Art diese Anforderungen sind, ist nicht festgelegt. In englischsprachigen Veröffentlichungen gibt es keinen speziellen Begriff für das Verbinden optischer Bauelemente mit mechanischen Bauelementen, hier wird der allgemeingültige Begriff für das Verbinden verwendet.

Außerhalb der optischen Technologien findet der Begriff Fassen nur vereinzelt Anwendung, beispielsweise in der Schmuckindustrie. Im Allgemeinen wird bei der Realisierung von Verbindungsaufgaben der Begriff Fügen verwendet. Dieser ist nach [DIN8593-0] als das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonsti-

ge Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff definiert.

[Hofm00], [Fisch00] verwenden in ihren Arbeiten den Begriff Fassen für das Verbinden rundoptischer Bauelemente mit mechanischen Fassungelementen, gehen aber auf Herkunft und genaue Bedeutung der verwendeten Begriffe nicht weiter ein. Frank verwendet in [Fran08] den Begriff Fassen zum einen für die unmittelbare Verbindung eines optischen Bauelementes mit einem mechanischen Bauelement und zum anderen für die mittelbare Verbindung von unmittelbar gefassten optischen Bauelementen zu einem Gesamtsystem. Diese Begriffsverwendung greift die beispielsweise in [Krau00] veröffentlichte Einordnung der Fassungstechnik als spezielle Verbindungsaufgabe auf. In der [DIN58722], welche Begriffe der Optikfertigung definiert, ist der Begriff Fassen nicht enthalten.

Nach [Krau00] ist das Fassen eines optischen Bauelementes eine spezielle Verbindungsaufgabe. Die optisch wirksamen Bauteile, meist aus Glas, werden mit den als Halterung oder Gestell dienenden mechanischen Fassungs teilen, bestehend aus metallischen Werk- oder Kunststoffen, verbunden. Die Realisierung dieser Verbindungsaufgabe kann mittelbar, unmittelbar, kraft-, form- oder stoffschlüssig, fest oder beweglich sein. In dieser Beschreibung sind wesentliche Punkte zur Charakterisierung des Begriffs Fassen bereits enthalten, jedoch ist ihre genaue Bedeutung nicht eindeutig dargestellt. Die im Folgenden durch den Autor gegebene Definition der Begriffe erfolgt in Anlehnung an die soeben dargestellte Begriffsverwendung und der in [Schu03] gegebenen Definition.

Der Begriff **Fassen** wird im Rahmen dieser Arbeit als die Realisierung einer speziellen Verbindungsaufgabe unter Beteiligung von optischen Bauelementen verstanden. In seiner Form als **unmittelbares Fassen** beschreibt das Fassen die Verbindung eines optischen Bauelementes mit einem mechanischen Bauelement. Ein unmittelbar gefasstes optisches Bauelement wird als **Fassglied** bezeichnet. In seiner Form als **mittelbares Fassen** beschreibt das Fassen die Verbindung eines bereits unmittelbar gefassten optischen Bauelementes (Fassgliedes) zu einem übergeordneten Strukturelement, beispielsweise einer Optikgruppe oder einem optischen System.

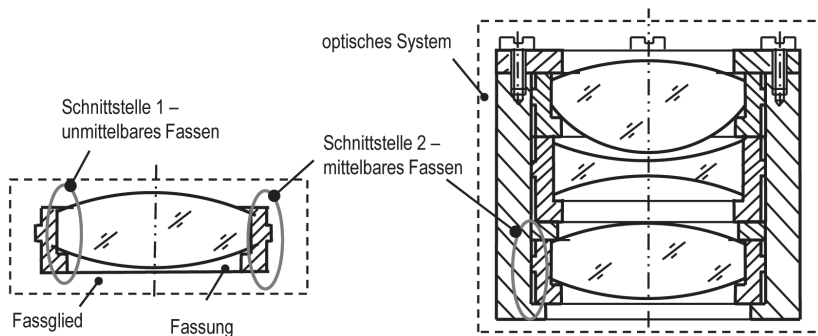


Abbildung 3-1 Mittelbares, unmittelbares Fassen

Eine **Fassung** ist dementsprechend ein mechanisches Bauelement, welches mindestens eine Schnittstelle zum Verbinden eines optischen Bauelementes mit dieser Fassung enthält und weitere Schnittstellen zum Verbinden weiterer optischer Bauelemente sowie Schnittstellen zum Verbinden zu einem Gesamtsystem enthalten kann. Zur Verdeutlichung der gegebenen Definitionen soll Abbildung 3-1 dienen.

Das Fassen als Themenkomplex beinhaltet entsprechend den oben gegebenen Definitionen Aufgaben, die mit der Erzeugung unmittelbar oder mittelbar gefasster optischer Bauelemente zu tun haben. Zur eindeutigen Beschreibung wird im Rahmen dieser Arbeit das unmittelbare Fassen dem Oberbegriff **unmittelbare Fassungstechnik**, das mittelbare Fassen dem Oberbegriff **mittelbare Fassungstechnik** zugeordnet. Die beschriebenen Teilaufgaben ordnen sich im Prozess der Herstellung optischer Systeme zwischen die Aufgabe der Herstellung optischer, mechanischer Bauelemente als Ausgangspunkt und die der vollständigen Funktionsprüfung der optischen Systeme als Abschluss ein. Zur Verdeutlichung wird auf Abbildung 3-2 verwiesen, welche den Prozessablauf beim Herstellen optischer Systeme schematisch und stark vereinfacht darstellt.

Der von [Hans74] geprägte Systembegriff ist in der Konstruktionswissenschaft sehr weit gefasst. Für die Belange dieser Arbeit soll der Begriff optisches System konkretisiert werden. Nach [DIN3140] sind optische Systeme in sich geschlossene Einheiten, die über mechanische Teile verbundene optische Bauele-

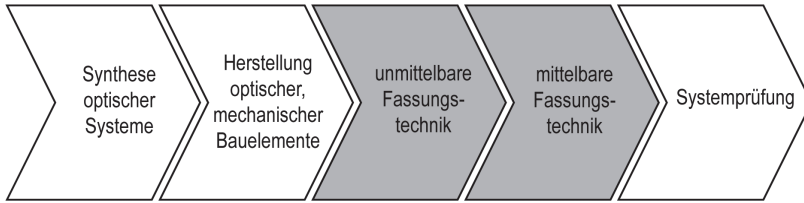


Abbildung 3-2 Prozesskette der Herstellung optischer Systeme

mente enthalten. Im Rahmen dieser Arbeit stellt ein **optisches System** ein technisches Gebilde dar, das aus mehreren Einzelementen aufgebaut ist und dessen Hauptfunktion in der Realisierung einer optischen Abbildungsfunktion besteht.

Neben Begriffen, die spezifisch dem Bereich der optischen Technologien zuzuordnen sind, finden die folgenden allgemein den Ingenieurwissenschaften zuzuordnenden Begriffe häufig Anwendung und sollen hiermit definiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Gesamtheit der Strukturen und Elemente, die zur Realisierung einer mechanischen Verbindung zwischen zwei Einzelteilen dienen, als **Schnittstelle** bezeichnet. Eine Schnittstelle kann aus ein oder mehreren **Koppelstellen** aufgebaut sein. Diese Koppelstellen werden durch miteinander in Kontakt stehende mechanische **Wirkflächen** gebildet. Nach Hansen sind Kopplungen Relationen zwischen Systemelementen, die eine Übertragung von Energie oder Stoff zwischen den Elementen gestatten [Hans74]. Wirkflächen sind die am Funktionsfluss beteiligten Flächen eines Einzelteils mit einer für diesen Zweck geeigneten Gestalt [Hans74]. Unter dem Begriff **Anordnung** werden allgemein Relationen zwischen Elementen eines Systems verstanden, die geometrische Relativlagen zueinander beschreiben [Hans74]. Anordnungen können durch die Nutzung von Koordinatensystemen eindeutig beschrieben werden [TUI03]. Zum besseren Verständnis der Begriffe werden diese am Beispiel einer Verbindung eines optischen Bauelementes mit einer Fassung mittels Vorschraubring in Abbildung 3-3 dargestellt. Die mechanische Verbindung besteht zwischen Linse und Fassung. Als an der Verbindung beteiligte Elemente sind die Fassung, die Linse und ein Vorschraubring vorzufinden.

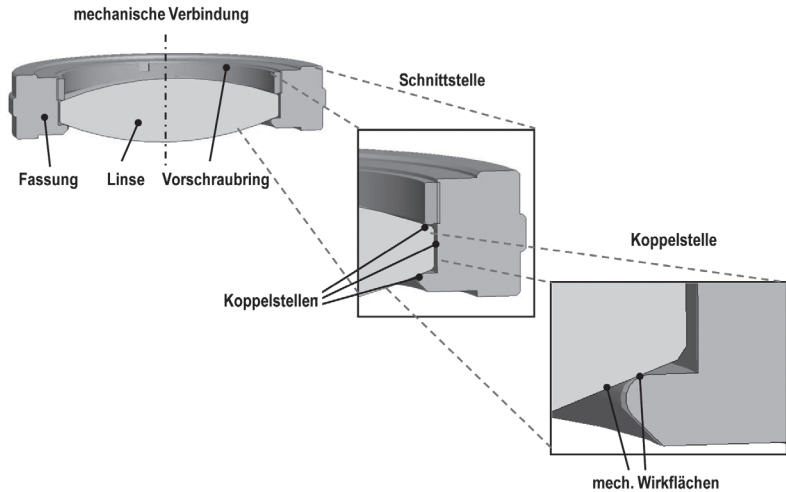


Abbildung 3-3 Einordnung der Begriffe Schnittstelle, Koppelstelle und Wirkflächen

3.2 Klassifizierung

Der in der Praxis übliche Begriff Hochleistungsoptik (HLO) ist nicht eindeutig definiert. Unter HLO wird in [Guye79], [Ebe86], [Bösw90], [Fran08] zum einen ein einzelnes optisches Bauelement verstanden, welches in einem optischen Hochleistungssystem Anwendung findet, zum anderen eine Struktur aus mehreren gefassten optischen Bauelementen, die zu einem optischen Hochleistungssystem verbunden sind. Zur eindeutigen Unterscheidbarkeit wird im weiteren Verlauf der Arbeit von **optischen Hochleistungsbauelementen** (OHB), beispielsweise Linsen und Spiegeln, und von **optischen Hochleistungssystemen** (OHS), beispielsweise Objektiven, gesprochen.

Die Möglichkeiten zur Bewertung eines optischen Systems und damit zur Charakterisierung von OHS sind vielfältig und nicht Inhalt der Arbeit. Eine festgelegte und allgemein anerkannte Klassifizierung existiert nicht. Zur Dar-

stellung des Bearbeitungsfeldes soll im Folgenden kurz auf eine aus der Literatur bekannte Möglichkeit der Klassifizierung eingegangen werden. [Guye88] und [Fisch00] nutzen als Gütekriterium zur Abgrenzung des Begriffs Hochleistungsobjektiv die **Strehlsche Definitionshelligkeit** (SR). Ihren Ursprung findet diese Einordnung unter anderem in Arbeiten von Marechal, der optische Systeme mit $SR \geq 80\%$ als beugungsbegrenzt bezeichnet [Mare47]. Die Strehlsche Definitionshelligkeit stellt nach [Hafe88] die in einem Punkt des Bildraums durch eine Lichtwelle erzeugte normierte Intensität dar. Normiert wird auf die Intensität, die eine im gleichen Punkt konvergierende Kugelwelle gleichen Öffnungswinkels erzeugen würde. Die SR ist dementsprechend ihrer Definition nach ein Gütekriterium, welches Wellenaberrationen darstellt. Bei Objektiven mit $SR \geq 95\%$ spricht [Guy88] von Hochleistungsobjektiven und unterlegt seine Aussage mit Anforderungen, die zur Realisierung einer realen optischen Abbildung dieser Abbildungsleistung notwendig sind. Beispielsweise sind dies Zentrier- und Luftabstandstoleranzen.

Eine ähnliche Vorgehensweise wird in [Fran08] gewählt; hier nutzt der Autor den Passfehler als primäres Unterscheidungsmerkmal und definiert anhand dessen Genauigkeitsklassen. Der **Passfehler** ist nach [ISO10110-5] der Abstand zwischen der Ist- und der theoretischen Solloberfläche eines opti-

Tabelle 3-1 Klassifizierung optischer Systeme nach Genauigkeitsklassen
[Fran08]

	Mittelklassen-optik	Hochleistungs-optik	Höchstleistungs-optik
Passfehler	$> \lambda/10$	$\lambda/10 \dots \lambda/20$	$< \lambda/20$
Luftabstandstoleranzen	$> 5 \mu\text{m}$	$1 \dots 5 \mu\text{m}$	$< 1 \mu\text{m}$
Zentriertoleranzen	$> 2''$ RFK	$0,2'' \dots 2''$ RFK	$< 0,5''$ RFK
Anwendungsgebiete	<ul style="list-style-type: none"> • Fotografie • Digitale Projektion • Zielfernrohre 	<ul style="list-style-type: none"> • Mikroskopie • Waferinspektion • Vermessungstechnik 	<ul style="list-style-type: none"> • Halbleiterlithografie
typische Linsendurchmesser	$5 \dots 50 \text{ mm}$	$5 \dots 300 \text{ mm}$	$10 \dots 300 \text{ mm}$
typische Losgrößen	> 100 Stück	$5 \dots 20$ Stück	$1 \dots 10$ Stück

schen Bauelementes. Die von [Fran08] verwendete Klassifizierung ist in Tabelle 3-1 dargestellt.

Nach [Hafe02] stellt die optische Abbildung eine Transformation derjenigen Eigenschaften der Objektstruktur in die Bildstruktur dar, die eine Modulation des Lichtes hervorrufen. Es wird dabei zwischen der abstrakten, der konkreten und der realen optischen Abbildung unterschieden. Die reale optische Abbildung ist die mit technischen Strukturen praktisch realisierte Abbildung. Die Exaktheit dieser Abbildung wird nach [Litf01] durch drei Faktoren begrenzt: die Beugung an der Öffnungsblende des optischen Systems, die auslegungsbedingten Abbildungsfehler und die herstellungsbedingten Fehler. Die technische Realisierung der Abbildung kann lediglich die beiden letzten Faktoren beeinflussen. Gegenstand dieser Arbeit sind Strukturen zum Aufbau von optischen Hochleistungssystemen. Dies sind Systeme, die auslegungsbedingt höchste Abbildungsleistungen ermöglichen. Die oben genannten auslegungsbedingten Abbildungsfehler grenzen deshalb im Sinne der Arbeit den praktischen Anwendungsbereich der Strukturen ab und stellen gleichzeitig den Ursprung für die Anforderungen an diese Strukturen dar. Im Rahmen dieser Arbeit sollen zur konkreten Einordnung des Betätigungsfeldes OHB, an [Fran08] anlehnend, dadurch gekennzeichnet sein, dass ihr Passfehler kleiner $\lambda/10$ ist. Als OHS werden Systeme mit $SR > 95\%$ bezeichnet.

Neben der Abgrenzung entsprechend dem Begriff optisches Hochleistungssystem wird im Rahmen dieser Arbeit eine weitere Einschränkung des Bearbeitungsfeldes auf Systeme kleiner Durchmesser gemacht. Diese Systeme sind gekennzeichnet durch die Verwendung optischer Bauelemente mit Außendurchmessern im Bereich von 10 bis 80 mm und entsprechenden Durchmessern von Fassgliedern im Bereich von 20 bis 160 mm; die mit Massen von 20 g bis 1 kg.

Die gegebene Einordnung soll eine Groborientierung bieten, stellt jedoch keine zwingende Systematik dar.

4 Mechanische Verbindungen

4.1 Einführung und Begriffe

Die Fassungs- und Systemmontagetechnik in OHS beschäftigt sich mit der Realisierung hoch spezialisierter Verbindungsaufgaben. Die Gestaltung von mechanischen Verbindungen nimmt deshalb im Rahmen der Bearbeitung der Aufgabenstellung eine herausgehobene Stellung ein. Aus diesem Grund sollen mechanische Verbindungen im Vorfeld genauer betrachtet werden.

Technische Systeme bestehen aus einer Vielzahl von Bauelementen. Das Verbinden von Einzelementen zu Strukturen höherer Komplexität ist deshalb eine der häufigsten Aufgaben im Rahmen des Konstruierens. Verbindungen haben in technischen Systemen zwei Hauptfunktionen. Zum einen dienen sie dazu, Bauelemente in bestimmter Art und Weise (fest, beweglich etc.) miteinander zu verbinden und im Rahmen dieser Verbindung Kräfte und Momente zu übertragen, zum anderen dazu, Bauelemente ggf. in bestimmter Relation zueinander zu positionieren. Aufgrund der unterschiedlichsten Anforderungen und Randbedingungen, welche an mechanische Verbindungen gestellt werden, sind verschiedene Arten von Verbindungen bekannt. Die Vielfalt von Ausführungsformen erfordert deren systematische Ordnung zur praktischen Auswahl und Anwendung. Arbeiten zur grundlegenden Klassifizierung und Einordnung im Rahmen der Konstruktionswissenschaften sind bekannt [Bisch58], [PaBe07], [Krau02]. Ein Versuch der Systematisierung wurde beispielsweise in [Gao83] unternommen. Danach kann eine Klassifizierung unter unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen. Häufig anzutreffen sind Klassifizierungen nach:

- den Schlussarten Kraft-, Form- und Stoffschluss,
- den Eigenschaften der Nutzung wie fest, beweglich, lösbar, unlösbar,

- den verwendeten Fertigungsverfahren wie Schraub-, Schweiß- oder Nietverbindungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Betrachtung auf feste mechanische Verbindungen beschränkt. Als **feste mechanische Verbindungen** werden entsprechend [Bisch58] Verbindungen bezeichnet, welche die Verbindungspartner in unveränderlicher Relativlage miteinander koppeln. Alternativ zum Begriff feste mechanische Verbindung findet in [TUI03] der Begriff starre mechanische Verbindung Anwendung.

Für die nachfolgenden Ausführungen sind die Begriffe Freiheit, Unfreiheit, Freiheitsgrad, Überbestimmtheit, Zwang und zwangarm von besonderer Bedeutung; sie sollen deshalb vorab dargestellt werden. Die Möglichkeit eines technischen Gebildes, eine Bewegung auszuführen, wird als **Freiheit f** bezeichnet. Eine verhinderte, das heißt durch technische Mittel gesperrte Bewegung wird als **Unfreiheit u** bezeichnet. Bezogen auf ein kartesisches Koordinatensystem besitzt beispielsweise der freie Körper im Raum sechs Bewegungsmöglichkeiten, also sechs Freiheiten: die drei Translationen entlang der Koordinatenachsen sowie die drei Rotationen um diese. Zur Beschreibung des Verhaltens eines technischen Gebildes kann der Begriff des Freiheitsgrades genutzt werden [TUI03]. Der **Freiheitsgrad F** ist die Anzahl der möglichen Bewegungsfreiheiten, die ein technisches Gebilde bezogen auf ein kartesisches Koordinatensystem hat. Der Begriff Gebilde wurde in diesem Fall eingeführt, um eine Konsistenz zwischen den unterschiedlichen in der Literatur verzeichneten Definitionen des Begriffs Freiheitsgrad herzustellen. Die erwähnten Unterschiede beziehen sich dabei nicht auf die wesentlichen Merkmale der Begriffsdefinition, sondern auf die einschränkende Verwendung des Begriffs zur Beschreibung eines einzelnen Körpers [TUI03], einer Koppelstelle [TUI03], [Schill82], [Krau00] oder einer Anordnung von mehreren Koppelstellen [Krau04]. Die Bedeutung des Begriffes Überbestimmtheit soll am Beispiel einer festen mechanischen Verbindung dargestellt werden, ist aber analog auf bewegliche Verbindungen übertragbar. In festen mechanischen Verbindungen wird die Beweglichkeit der Verbindungspartner zueinander bis zur Unbeweglichkeit eingeschränkt. Damit haben feste Verbindungen den Freiheitsgrad $F = 0$. Die Summe der in den Koppelstellen

einer Verbindung vorhandenen Unfreiheiten muss dementsprechend $u \leq 6$ sein. Bei $u < 6$ werden verbleibende Freiheiten durch die Sicherung eliminiert. Ist die Summe $u > 6$, dann ist mindestens eine Freiheit mehrfach gesperrt. Die Anzahl der in einer mechanischen Verbindung mehrfach vorhandenen Unfreiheiten wird als **Überbestimmtheit** \ddot{u} bezeichnet. Um festzustellen, ob ein Gebilde überbestimmt ist, erweist es sich als zweckmäßig, dessen Unfreiheiten zu betrachten. Diese Betrachtung darf sich allerdings nicht auf die Ermittlung der Anzahl der vorhandenen Unfreiheiten beschränken, darüber hinaus ist die Lage der einzelnen Koppelstellen zueinander zu beachten, da diese in ihrer Wirkung eine bestimmte Richtung haben. Allgemein gilt für die Bestimmung von Überbestimmtheiten Gl. 4-1 [TUI03].

$$\ddot{u} = u_{\text{vorh}} - u_{\text{zul}} \quad \text{Gl. 4-1}$$

Dabei stellt u_{zul} die für die Funktionserfüllung der Verbindung notwendige Anzahl von Unfreiheiten und u_{vorh} die Anzahl der vorhandenen Unfreiheiten dar. Für ein starres Gebilde aus n Teilen ergibt sich die Summe der maximal zulässigen Unfreiheiten entsprechend Gl. 4-2 [Schill82].

$$\sum u_{\text{zul}} = 6 \cdot (n - 1) \quad \text{Gl. 4-2}$$

Wird in einem technischen Gebilde die Anzahl der zulässigen Unfreiheiten überschritten, ergibt sich eine Strukturredundanz; die Auswirkung dieser Redundanz wird als **Zwang** bezeichnet. Derartige Anordnungen widersprechen dem Konstruktionsprinzip der Eindeutigkeit. Sie können ihre Funktion nur erfüllen, wenn bestimmte Identitätsforderungen erfüllt sind. Geht die Einhaltung der Identitätsforderung verloren, beispielsweise durch die Einwirkung von Störgrößen, so kann die technische Funktion bis zur Funktionsuntüchtigkeit eingeschränkt werden, da es entweder nicht zur mechanischen Berührung in den redundanten Koppelstellen kommt oder diese gewaltsam durch Deformation erzwungen wird. Überbestimmtheiten sind deshalb durch Mehraufwand in der Herstellung und Empfindlichkeit gegen äußere Einflüsse gekennzeichnet. Besonders kritisch wirkt sich diese Empfindlichkeit im Präzisionsgerätebau

aus, wo Zwangskräfte die Gerätefunktion erheblich beeinträchtigen können [Schil82], [Krau00]. Für die gänzliche Vermeidung von Überbestimmtheiten sind häufig Koppelstellen mit punkt- oder linienförmiger Berührung notwendig, welche durch ihre geringe Steifigkeit und hohe Flächenpressung hinsichtlich ihrer allgemeinen Anwendbarkeit limitiert sind. In festen Verbindungen lassen sich deshalb Überbestimmtheiten nicht in jedem Fall vermeiden, und sie müssen durch gezielte Maßnahmen beherrscht werden. Überbestimmte Anordnungen, in denen durch geeignete Maßnahmen die Auswirkungen der Überbestimmtheit begrenzt werden, werden als **zwangarme Anordnungen** bezeichnet. In der Praxis häufig anzutreffende Maßnahmen zur Einhaltung oben dargestellter Identitätsforderungen sind die gemeinsame Bearbeitung, das Einpassen, das Justieren und eine elastische Bauweise.

Als Ausgangspunkt für die sich anschließenden Betrachtungen lässt sich feststellen, dass in der Literatur umfangreiche Arbeiten zur Klassifizierung und zu den Eigenschaften spezieller mechanischer Verbindungen vorliegen. Zum grundlegenden Aufbau mechanischer Verbindungen und den daraus resultierenden charakteristischen Eigenschaften finden sich nur allgemeine Aussagen. Zwar können die praktisch tätigen Ingenieure hierzu häufig auf empirisch erworbene Erfahrungen zurückgreifen, jedoch sind diese nicht allgemein zugänglich dokumentiert. Im Folgenden sollen zunächst die allgemein bekannten Betrachtungsweisen zum grundlegenden Aufbau mechanischer Verbindungen dargestellt und anschließend im Sinne der Zielstellung dieser Arbeit zweckmäßig erweitert werden.

4.2 Aufbau fester mechanischer Verbindungen

Wesentliche Merkmale fester mechanischer Verbindungen sind in [Bisch58] und darauf aufbauend in [Krau04] aufgeführt. Entsprechend der im vorigen Abschnitt vorgestellten Definition wird als Zweck einer festen mechanischen Verbindung der Aufbau eines technischen Gebildes aufgeführt, in dem mehrere Einzelteile in unveränderlicher Relativlage miteinander gekoppelt werden. Um dies zu gewährleisten, sind die folgenden drei Bedingungen zu erfüllen:

- Die zu verbindenden Teile müssen paarungsfähige Wirkflächen haben.
- Die Wirkflächen müssen in einen körperlichen Zusammenhang gebracht werden.
- Der Zusammenhang muss so gesichert werden, dass sich ein Freiheitsgrad $F = 0$ ergibt.

Unter einer **Paarung** versteht man das gedankliche Zusammenbringen zweier Teile zu einem Paar von Elementen, die sich in ihren Wirkflächen berühren [Schill82]. Das Verbringen der Teile in einen körperlichen Zusammenhang wird als **Fügen** bezeichnet [Krau04]. Die Realisierung der ersten und zweiten Bedingung soll nachfolgend unter dem Oberbegriff der Gestaltung von Koppelstellen betrachtet werden. Die dritte Bedingung bezieht sich auf die Sicherung von Verbindungen. Hierbei ist in festen mechanischen Verbindungen zwischen der Sicherung des körperlichen Zusammenhangs in den Koppelstellen und der Sicherung aller nicht durch Koppelstellen definierten Freiheiten zu unterscheiden. In bisherigen Veröffentlichungen zur Gestaltung fester Verbindungen werden Koppelstellen und Sicherung als Einheit betrachtet. Dies findet sich auch in der üblichen Klassifizierung nach kraft-, form- oder stoffschlüssigen Verbindungen wieder. Diese Vorgehensweise bietet zwar die Möglichkeit einer Klassifizierung, erschwert aber die systematische Ableitung von Eigenschaften im Rahmen der Analyse anhand konkreter Kriterien ebenso wie die gezielte Entwicklung von festen Verbindungen mit spezifischen Eigenschaften. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb vorgeschlagen, Koppelstellen und Sicherung von festen mechanischen Verbindungen als voneinander getrennte Funktionselemente zu betrachten. Diese bestimmen durch ihre Eigenschaften und ihr Zusammenwirken die Eigenschaften der mechanischen Verbindung. Aufgabe der folgenden Abschnitte ist es, hierfür die Grundlagen zu erarbeiten.

4.3 Koppelstellen fester mechanischer Verbindungen

Entsprechend der Darstellung in Kapitel 4.2 werden mechanische Verbindungen durch miteinander in Kontakt stehende Wirkflächen gebildet. Die spezifi-

schen Eigenschaften von Verbindungen werden deshalb unter anderem durch die Art, Anordnung und Anzahl der in Kontakt stehenden Wirkflächen bestimmt. Ein in Kontakt stehendes Wirkflächenpaar wird in diesem Zusammenhang als Koppelstelle bezeichnet.

Die praktisch anwendbaren Wirkflächenkombinationen zur Gestaltung von Koppelstellen sind im Wesentlichen durch die technologisch realisierbaren Geometrieelemente bestimmt und lassen sich auf eine Anzahl von Grundkombinationen zurückführen. Diese Kombinationen und ihre Unfreiheiten sind in Abbildung 4-1 dargestellt.

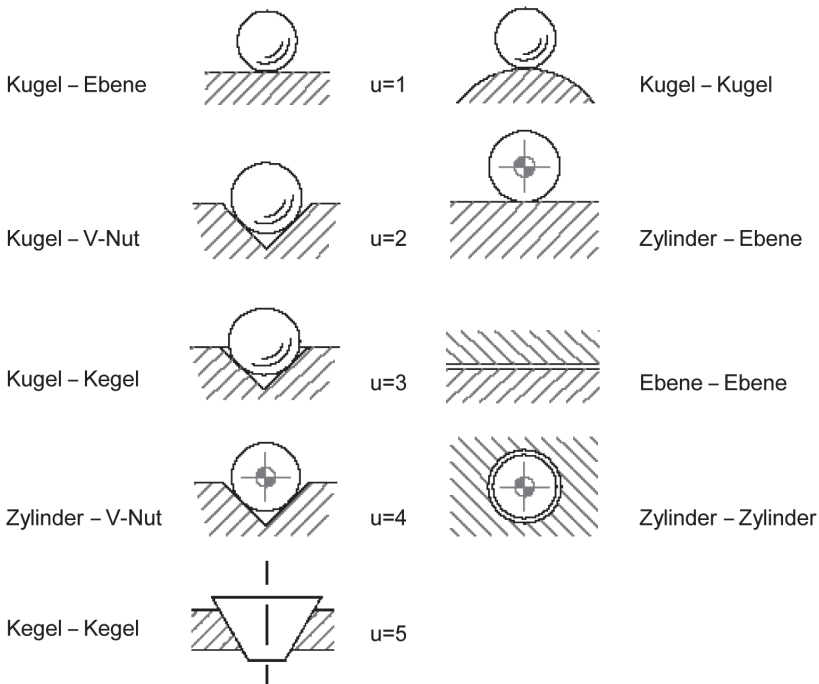


Abbildung 4-1 Unfreiheiten u von Wirkflächenkombinationen [Schil82], [Krau00]

Hinsichtlich der Art ihrer Berührung lassen sich Koppelstellen in Kombinationen mit punkt-, linien- und flächenförmiger Kontaktfläche unterscheiden. Punkt- oder linienförmige Berührungen finden nur im idealisierten Fall statt. Durch die Elastizität der beteiligten Bauteile entsteht in der Kontaktstelle eine Abplattung und eine Kontaktfläche; diese ist bei **Punktberührung** kreis- und bei **Linienberührung** rechteckförmig ausgebildet. Größe und Spannung in der Kontaktfläche lassen sich nach Hertz¹ berechnen. Nach Schilling berühren sich beliebig geformte Wirkflächen zunächst nur punktförmig, wenn keine besonderen Bedingungen an die Wirkflächen gestellt werden [Schil82]. **Linienförmige Berührungen** zwischen Wirkflächen finden nur statt, wenn zusätzliche Forderungen hinsichtlich der Formtreue der beteiligten Wirkflächen erfüllt sind. Als Beispiel hierfür kann die Wirkflächenkombination Kugel – Kegel dienen. Zu einer linienförmigen Berührung kommt es nur, wenn beide Wirkflächen von der Idealgestalt nicht abweichen; dabei ist es in gewissen Grenzen gleichgültig, welchen Durchmesser die Kugel und welchen Kegelwinkel der Kegel aufweist. Für die Realisierung einer **flächenförmigen Berührung** sind neben der Forderung nach Formtreue zusätzlich Forderungen hinsichtlich der Maßtreue zu gewährleisten. Als Beispiel hierfür kann die Kombination Vollzylinder – Hohlzylinder angeführt werden. Die Wirkflächen berühren sich nur flächenförmig, wenn sie sowohl ideal zylinderförmig sind als auch gleiche Durchmesser aufweisen. Der dargestellte Sachverhalt gilt ebenso für die Kombination von zwei Ebenen, als Sonderfall der Kombination von Kugeln mit unendlichem Radius.

Die dargestellten zusätzlichen Anforderungen hinsichtlich Idealgestalt und Maßtreue bei linien- oder flächenförmiger Berührung sind in ihrer technischen Realisierung nur begrenzt zu erfüllen. Dies kann in der Praxis bei Anordnungen mit linien- oder flächenförmiger Berührung in den Koppelstellen selbst bei zwangsfreiem Aufbau ($u_{\text{vorh}} \leq u_{\text{zul}}$) zu undefinierten Berührungszuständen und damit unter Krafteinwirkung zu Verformungen und mechanischen Spannungen

1 Unter Hertzscher Pressung versteht man die maximale Spannung, die in der Mitte der Kontaktfläche zweier elastischer Körper mit homogenen, isotropen Werkstoffeigenschaften herrscht. Die Höhe der Hertzschen Pressung ist von der Kraft, mit der die beiden Körper in der Kontaktstelle zusammengepresst werden, von den Krümmungsradien der beteiligten Wirkflächen und vom Elastizitätsmodul abhängig.

gen führen. In der Feinwerktechnik kommen deshalb bei Anordnungen, in denen nur geringe Kräfte übertragen werden, Koppelstellen mit punktförmiger Berührung entsprechend Abbildung 4-2 a) zur Anwendung. Besteht aus funktionellen oder technologischen Gründen die Notwendigkeit zur Verwendung von Koppelstellen mit linien- oder flächenförmiger Berührung, so werden diese in der Regel zwangarm ausgeführt. Dies ist exemplarisch in Abbildung 4-2 b) dargestellt. Die negativen Auswirkungen der Überbestimmtheit durch mehrfache Verwendung flächenförmiger Berührungen werden hier durch definiert kleine Koppelstellen begrenzt.

Die Wirkflächen einer Koppelstelle bestimmen entsprechend Abbildung 4-1 zum einen deren Freiheit und zum anderen deren Fügeichtung bzw. deren Fügebereich. Die **Fügeichtung** ist die Richtung, in der sich ein Wirkflächenpaar in einen körperlichen Zusammenhang bringen lässt. Sofern sich Wirkflächenpaare in mehreren Richtungen vereinigen lassen, wird die Summe dieser Richtungen als **Fügebereich** bezeichnet [Bisch58].

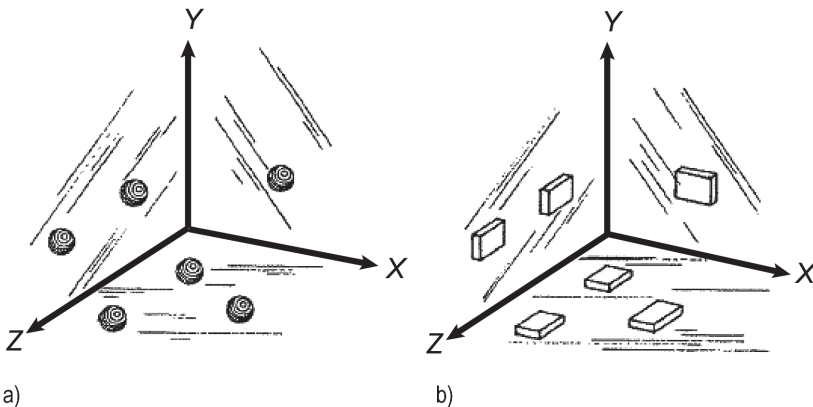


Abbildung 4-2 Mechanische Lagedefinition in sechs Freiheiten für ein Prisma
a) zwangsfreie Ausführung durch Koppelstellen mit Punktberührung
b) zwangarme Ausführung durch definierte Flächenberührung [Yod05]

Weiterhin spielt die relative Anordnung der Wirkflächen zueinander eine wesentliche Rolle für die Eigenschaften einer Koppelstelle. Dies soll anhand eines Beispiels dargestellt werden. Abbildung 4-3 a) zeigt den schematischen Aufbau einer Koppelstelle Kugel – V-Nut. Der zugehörige Kräfteplan ist in Abbildung 4-3 b) dargestellt und lässt erkennen, dass sich in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel 2α die aus einer axialen Vorspannkraft F_V resultierenden Normalkräfte F_N verändern. Dementsprechend lassen sich über den Öffnungswinkel 2α in Kombination mit dem Reibwert μ Eigenschaften wie Selbsteinstellung oder Selbstsperrung der Koppelstelle gezielt einstellen.

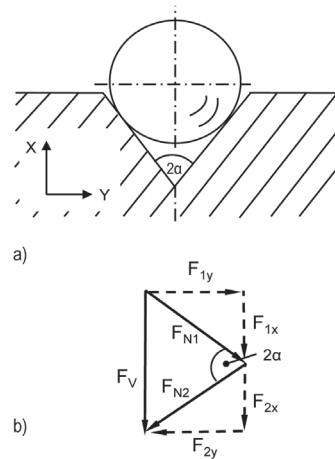


Abbildung 4-3 a) Koppelstelle Kugel – V-Nut
b) Kräfteplan

Feste mechanische Verbindungen sind grundsätzlich aus mindestens einer, vielfach aber aus mehreren Koppelstellen aufgebaut. Beim Aufbau aus mehreren Koppelstellen spielt die relative Anordnung dieser zueinander eine wesentliche Rolle für die Funktionserfüllung. Hierbei sind zwei Aspekte zu unterscheiden: zum einen die Anordnung der Koppelstellen unter dem Gesichtspunkt der gesperrten Freiheiten, zum anderen deren Anordnung unter funktionellen Gesichtspunkten, beispielsweise/etwa/zum Beispiel erreichbare Genauigkeiten oder Selbsteinstellung unter Einfluss von Störgrößen. Für die Betrachtung der gesperrten Freiheiten ist die Wirkrichtung der Koppelstellen von Bedeutung; dies ist die Richtung, in der die Normalkräfte in den Koppelstellen wirken. Dies soll exemplarisch an einer Verbindung mit sechs Unfreiheiten nach Abbildung 4-2 a) demonstriert werden. Die Lagedefinition findet in dieser Anordnung mithilfe der Koppelstelle Kugel – Ebene statt. Diese sperrt eine Bewegungsfreiheit; mit sechs Koppelstellen lassen sich somit alle sechs Freiheiten der Bewegung definieren. Die nicht bildhaft dargestellte Anordnung der sechs

Koppelstellen in nur einer Ebene würde durch die konkrete Wirkrichtung der Koppelstelle Kugel – Ebene zu einer in drei Freiheiten überbestimmten und drei Freiheiten nicht bestimmten Anordnung führen. Nur die in Abbildung 4-2 gezeigte Anordnung der sechs Koppelstellen in drei Ebenen eines kartesischen Koordinatensystems führt zu einem eindeutig bestimmten, funktionsfähigen Aufbau. Dies zeigt, dass nicht nur Art und Anzahl der verwendeten Koppelstellen, sondern auch ihre räumliche Anordnung Einfluss auf die Bestimmtheit einer Anordnung haben.

Unter funktionellen Gesichtspunkten spielt neben der qualitativen Anordnung der Koppelstellen in verschiedenen Ebenen eines Koordinatensystems auch ihre quantitative Lage zueinander eine wichtige Rolle für die Funktionserfüllung. Beispielhaft kann dies anhand des Abstandes der einzelnen Koppelstellen dargestellt werden. Zwei in einer Ebene angeordnete Koppelstellen Kugel – Ebene sperren eine Translation und eine Rotation. Abhängig vom Abstand der beiden Koppelstellen wirken sich Fehllagen der Koppelstellen zueinander, beispielsweise bedingt durch Fertigungsabweichungen, in unterschiedlich starken absoluten Verkipnungen der beteiligten Bauteile zueinander aus.

Zusammenfassend lässt sich aussagen, dass die Auswahl und Anordnung der miteinander in Kontakt stehenden Wirkflächen einer mechanischen Verbindung wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften der Verbindung haben und im Rahmen der Konzeption berücksichtigt werden müssen.

Die bisher getroffenen Aussagen zur Gestaltung von Koppelstellen betreffen vor allem die in Kontakt stehenden Wirkflächen. Diese Darstellung entspricht der in der Literatur [Krau00], [Krau04], [TUI03], [PaBe07], [Schill82], [Bisch58] üblichen Betrachtungsweise. Diese Betrachtungsweise soll im Folgenden erweitert werden. Eine Erweiterung ist aus Sicht des Autors erforderlich, um Lösungen auf Basis von Festkörpergelenken zweckmäßig einordnen zu können.

Auf funktioneller Ebene betrachtet werden in mechanischen Koppelstellen unter anderem folgende zwei Funktionen umgesetzt:

- Herstellung des körperlichen Kontakts zwischen den zu verbindenden Bauteilen.
- Gezielte Definition von Freiheiten der Bewegung.

Die oben aufgeführte wirkflächenorientierte Betrachtungsweise geht von einer Funktionsintegration dieser beiden Funktionen aus. Dies bedeutet, dass über die miteinander in Kontakt stehenden Wirkflächen einer Koppelstelle gezielt Freiheiten der Bewegung definiert werden. Diese Integration ist nicht zwangsläufig und kann getrennt werden; hierzu ist die Nutzung von Festkörpergelenken in der Feinwerktechnik üblich. Diese soll anhand von Abbildung 4-4 exemplarisch dargestellt werden. Abbildung a) zeigt jeweils eine Kombination von mechanischen Wirkflächen mit bestimmten Freiheiten, Abbildung b) zeigt eine Möglichkeit der Umsetzung über Festkörpergelenke; in diesem Fall ist die Gestaltung der mechanischen Kontaktfläche zwischen den Bauteilen unabhängig von den gesperrten Freiheiten der Koppelstelle. Die Nutzung von Festkörpergelenken hat den Vorteil, dass ihre Wirkungsweise auf innerer Reibung beruht. Durch ihre Nutzung können gleitreibungsbehaftete Relativbewegungen zwischen den beteiligten Bauteilen vermieden werden, was besonders für Anwendungen mit höchsten Anforderungen an Genauigkeit und Reproduzierbarkeit von Vorteil ist. Da Festkörpergelenke für die Erzeugung von Be-

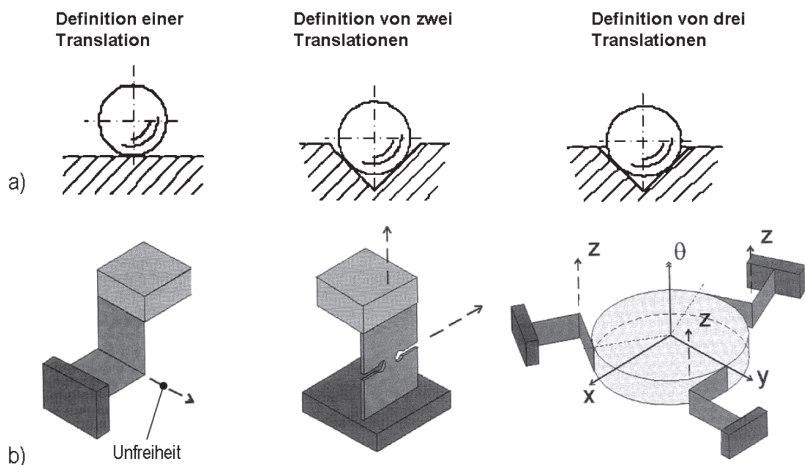


Abbildung 4-4 Freiheiten in mechanischen Koppelstellen a) durch Wirkflächenkontakt b) durch Festkörpergelenke [EUSP10]

wegungsfreiheiten Verformungen im elastischen Bereich nutzen, können mit ihnen nur kleine Bewegungen realisiert werden.

Die hier vorgenommene Erweiterung ist sinnvoll, um das Verständnis von Wirkzusammenhängen in mechanischen Verbindungen zu fördern und die Möglichkeiten für ihre systematische Gestaltung zu vergrößern. Besonders für Koppelstellen, die aufgrund der zu übertragenden Kräfte mit Wirkflächen auf Basis von Flächenberührung aufgebaut werden müssen, können in Kombination mit Festkörpergelenken gezielt Freiheiten hinzugefügt werden.

4.4 Sicherung mechanischer Verbindungen

Die Ausführungen zu den Koppelstellen im vorhergehenden Abschnitt sind von einem offenen, kraftgepaarten Zustand ausgegangen. Zur Erzeugung einer festen mechanischen Verbindung muss der durch das Fügen erzeugte körperliche Zusammenhang in den Koppelstellen gesichert werden. Hierzu sind die Füge-richtung und die verbleibenden Bewegungsfreiheiten zu sperren. Entsprechend der in der Literatur [Bisch58], [Schill82], [TUI03] üblichen Betrachtungsweise finden hierfür kraft-, form- und stoffschlüssige Verfahren Anwendung. Die durch diese Verfahren erzeugten funktionellen Bestandteile einer Verbindung sollen im Rahmen der Beschreibung von mechanischen Verbindungen als kraft-, form- und stoffschlüssige Verbindungsbestandteile bezeichnet und im Folgenden dargestellt werden.

In **kraftschlüssigen Verbindungsbestandteilen**² werden äußere Kräfte genutzt, um in den Fügeflächen der beteiligten Bauteile Reibkräfte zu erzeugen. Diese Reibkräfte haben die Aufgabe, die Verbindungspartner in ihrer gegenseitigen Lage zu halten. Der grundsätzliche Aufbau ist schematisch in Abbildung 4-5 dargestellt. Die dargestellte Verbindung weist kraft- und form-

2 In ihrer grundsätzlichen Funktionsweise sind kraftschlüssige Verbindungsbestandteile im Rahmen der Betrachtung fester mechanischer Verbindungen mit Reibgesperren im Rahmen der Betrachtung beweglicher Verbindungen vergleichbar. Jedoch hat ein Gesperre laut Definition die Funktion, ein gelagertes oder geführtes Bauteil vorübergehend an einer möglichen Bewegung vollständig zu hindern [Krau04].

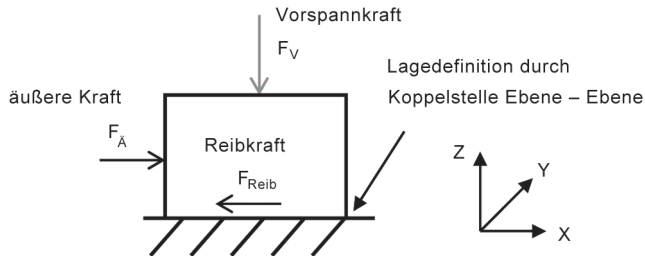


Abbildung 4-5 Wirkungsweise kraftschlüssiger Verbindungsbestandteile

schlüssige Verbindungsbestandteile auf. Durch die Koppelstelle Ebene – Ebene sind die Bewegungsfreiheiten Translation entlang der z-Achse sowie Rotation um x- und y-Achse durch formschlüssige Verbindungsbestandteile gesichert; auf diese soll im Folgenden nicht weiter eingegangen werden. Die Bewegungsfreiheit Translation entlang der x- und y-Achsen und die Rotation um die z-Achse sind durch kraftschlüssige Verbindungsbestandteile gesichert. Für diese Freiheiten gelten die folgenden Aussagen.

Die Reibkraft zur Sicherung des Zustandes wird entsprechend Gl. 4-3 durch eine ihr senkrechte Normalkraft erzeugt.

$$F_{\text{Reib}} = \mu \cdot F_N \quad \text{Gl. 4-3}$$

Um die Sicherung unter Wirkung äußerer Kräfte F_A aufrechtzuerhalten, muss die Sicherungskraft F_S entsprechend Gl. 4-4 größer als die äußere Kraft sein.

$$F_S = F_{\text{Reib}} \cdot s_f = \mu \cdot F_N \cdot s_f \geq F_A \quad \text{Gl. 4-4}$$

Es lässt sich festhalten, dass kraftschlüssige Verbindungsbestandteile immer eine wirkende Normalkraft benötigen. Dabei gilt, dass diese mindestens um den Faktor $1/\mu$ größer sein muss als die zur Sicherung benötigte Reibkraft bzw. dass Kräfte nur bis zur Höhe der erzeugten Reibkraft übertragen werden können.

In der Literatur [Krau00], [PaBe07] sind formschlüssige Verbindungen üblicherweise dadurch gekennzeichnet, dass eine gegebene Kombination von

Koppelstellen vorliegt. Dieser Kombination werden durch plastische oder elastische Verformung weitere Koppelstellen in der Weise hinzugefügt, dass die Fügerichtung der vorhandenen Koppelstellen gesperrt wird. Diese bisher übliche Charakterisierung ist aus Sicht des Autors nicht vollständig. Sie beschreibt nur eine Möglichkeit der Umsetzung der Sicherungsfunktion, die darin besteht, eine Normalkraft zu den in Kontakt stehenden Wirkflächen zu erzeugen, welche wiederum den Zusammenhang in diesen Wirkflächen dauerhaft sichert.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen **formschlüssige Verbindungsbestandteile** dadurch gekennzeichnet sein, dass sie den körperlichen Zusammenhang der mechanischen Wirkflächen durch zu ihnen senkrechte Normalkräfte dauerhaft sichern. In welcher Art diese Kräfte aufgebracht werden, ist dabei zweitrangig. Werden die zur Sicherung notwendigen Normalkräfte jedoch, wie es in der Praxis häufig der Fall ist, durch zusätzliche mechanische Koppelstellen auf die beteiligten Bauelemente übertragen, so sind diese bei der Betrachtung der Unfreiheiten der Verbindung einzubeziehen.

Kraft- und formschlüssige Verbindungsbestandteile sind sich entsprechend der oben gegebenen Einteilung ähnlich, da sie beide auf Normalkräften senkrecht zu den in Kontakt stehenden Wirkflächen beruhen. Der Unterschied besteht in der konkreten Wirkungsweise. Die Lagesicherung in kraftschlüssigen Verbindungsbestandteilen erfolgt durch Reibkräfte in den mechanischen Wirkflächen. Die Lagesicherung in formschlüssigen Verbindungsbestandteilen wirkt direkt und setzt entsprechend geformte Wirkflächen voraus. Da in der Praxis der Kontakt zwischen mechanischen Wirkflächen immer reibungsbehaftet ist, werden beide Bestandteile, wie in Abbildung 4-5 dargestellt, auch immer gemeinsam auftreten. Die hier vorgenommene funktionale Trennung ist dennoch methodisch sinnvoll, da sich beide in Wirkungsweise und Eigenschaften unterscheiden.

Stoffschlüssige Verbindungsbestandteile sind dadurch charakterisiert, dass sie durch stoffschlüssige Verfahren erzeugt werden. Hierbei erfolgt der Zusammenhalt durch stoffliches Vereinigen der beteiligten Bauteilwerkstoffe oder durch Zusatzwerkstoffe über Molekular- und Adhäsionskräfte an den Wirkflächen der Fügestelle [PaBei07]. Eine Übersicht zu den Verfahrenshauptgruppen zur Erzeugung stoffschlüssiger Verbindungen ist in [Krau04] zu finden.

Grundsätzliche Eigenschaften stoffschlüssiger Verbindungsbestandteile sind die Spielfreiheit und die Unlösbarkeit ohne Zerstörung des Stoffgefüges. Eine differenziertere Darstellung von Eigenschaften ist durch das breite Spektrum der unterschiedlichen Verfahren und ihrer Charakteristika im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Da das Kleben für das im Kapitel 6 dargestellte unmittelbare Fassen optischer Bauelemente eine besondere Rolle spielt, werden im Folgenden charakteristische Eigenschaften stoffschlüssiger Verbindungsbestandteile auf Basis von Klebeverbindungen dargestellt.

Unter **Kleben** selbst versteht man das Verbinden gleicher oder ungleicher Werkstoffe unter Verwendung eines Klebstoffes [Habe07]. Bei einem **Klebstoff** handelt es sich um einen nichtmetallischen Stoff [DINEN923], der Fügeteile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit verbinden kann [Krau00]. Klebstoffe bestehen in den meisten Fällen neben ein oder mehreren Grundstoffen aus verschiedenen Zusatzstoffen, sogenannten **Füllstoffen** zur Erzeugung bestimmter Eigenschaften. Beispielsweise können die Festigkeit des Klebstoffes, der Temperaturanwendungsbereich oder die Schwindung beim Aushärten durch Füllstoffe beeinflusst werden. Besonders hervorzuheben ist, dass in Klebungen als Eigenspannungen definierte Spannungszustände immer vorhanden sind. Für das Auftreten dieser Spannungen gibt es eine Reihe von Gründen [Habe07].

Eigenspannungen entstehen durch Schwindung des Klebers im Rahmen von Aushärtungsvorgängen. Diese Art der Eigenspannungen beruht auf einer Volumenverringerung des Klebstoffes in der Klebefuge im Rahmen von Umwandlungsvorgängen.

Eigenspannungen werden hervorgerufen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Fügepartikelwerkstoff und Klebstoff – die Wärmeausdehnungskoeffizienten ausgehärteter Klebschichten liegen in der Regel wesentlich über denen von Fügepartikeln wie Glas oder Metall. Bei Temperaturänderungen kommt es deshalb zu unterschiedlichen Verformungen von Klebschicht und Fügepartikeln und damit zu Spannungszuständen.

Als besondere Form der Eigenspannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten sind die Spannungen bei Temperaturwechselbeanspruchung zu betrachten. Diese Spannungen sind besonders bei Klebungen

vorzufinden, die unter Druck oder in runden Klebefugen aushärten. Bei Temperaturerhöhung bilden sich Druckspannungen, die abhängig von der Verweilzeit durch plastische Verformung im Klebstoff relaxieren. Bei Abkühlung führen diese nicht reversiblen Verformungen zu bleibenden Zugspannungen.

Eigenspannungen durch Alterungsvorgänge im Klebstoff treten auf, wenn es infolge von Umgebungseinflüssen zu Volumenänderungen in der Klebschicht kommt. Von besonderer Bedeutung ist hier Feuchtigkeit bzw. die Änderung der Feuchtigkeit, die zu Wasseraufnahme bzw. -abgabe und somit zu einer Volumenänderung führt.

Die soeben dargestellten Ausführungen zu Eigenspannungen in Klebeverbindungen bzw. Klebeverbindungsbestandteilen haben besonders auf das Verbinden optischer Bauelemente mit mechanischen Fassungen Auswirkungen und sollen in diesem Zusammenhang in den nachfolgenden Kapiteln Anwendung finden.

4.5 Kombination von Koppelstellen und Sicherung

Neben den charakteristischen Eigenschaften von Koppelstellen und sichernden Verbindungsbestandteilen sind für die Eigenschaften einer Verbindung auch die Wechselwirkungen zwischen diesen von Bedeutung. Diese Wechselwirkungen spielen besonders unter Einfluss von Störgrößen eine wichtige Rolle und sollen im Folgenden anhand eines stark schematisierten Beispiels dargestellt werden.

Abbildung 4-6 zeigt eine feste Verbindung zwischen einem Quader und einem Gestell, die Lagedefinition zwischen Quader und Gestell erfolgt in fünf Freiheiten durch zweifache Anordnung der Koppelstelle Ebene – Ebene. Die Ausführung der seitlichen Koppelstelle als Ebene-Ebene-Paarung wurde aus Gründen der besseren Darstellbarkeit gewählt. Die Auswirkung der Überbestimmtheit durch diese Koppelstelle wird durch ihre sehr kurze Ausführung begrenzt, ist jedoch für die folgenden Darstellungen nicht von Bedeutung. Die Lagedefinition der Translation senkrecht zur Richtung der Abbildung ist für die durchzuführende Betrachtung vernachlässigbar und deshalb nicht dargestellt. Die linke Darstellung in Abbildung 4-6 zeigt jeweils den Zustand der

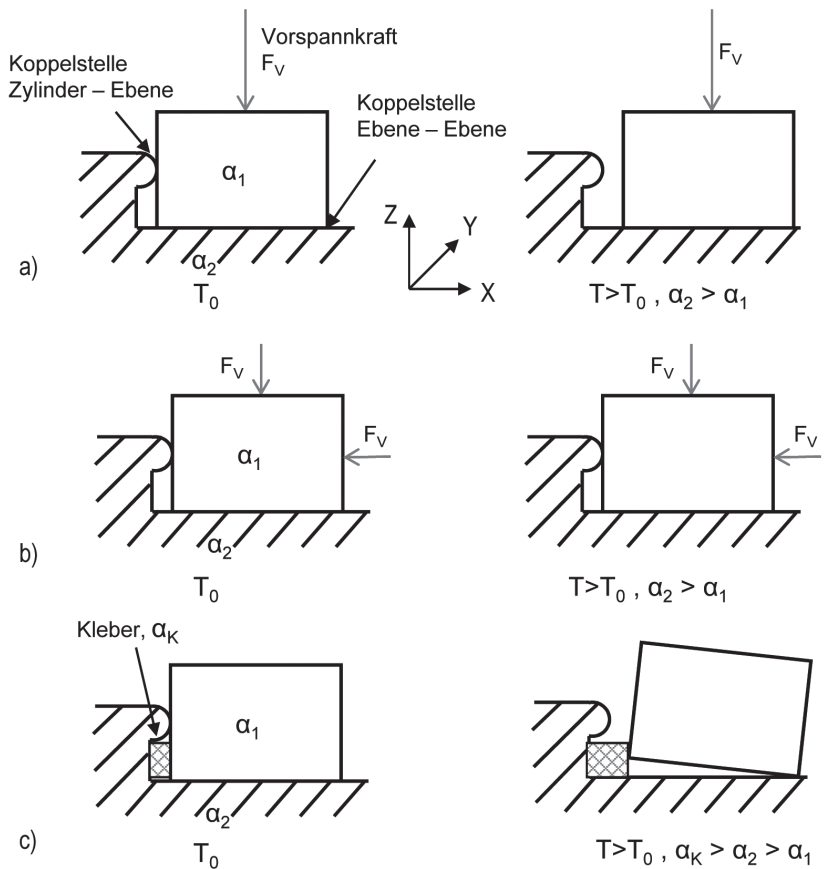


Abbildung 4-6

Wirkungsweise sichernder Verbindungsbestandteile in Abhängigkeit von der Temperatur

- a) Sicherung als Kombination aus kraft- und formschlüssigen Verbindungsbestandteilen
- b) Sicherung durch formschlüssige Verbindungsbestandteile
- c) Sicherung durch stoffschlüssige Verbindungsbestandteile

Verbindung nach ihrer Sicherung bei einer Bezugstemperatur T_0 . Bei Temperaturen, die sich von der Bezugstemperatur unterscheiden, kommt es zu Volumenänderungen in den beteiligten Bauelementen. Diese Änderungen sind abhängig von den spezifischen Wärmeausdehnungskoeffizienten α . Das Ergebnis dieser Volumenänderungen, die sich in Abhängigkeit von den zur Sicherung verwendeten Verbindungsbestandteilen ergeben, ist jeweils in der rechten Darstellung gegeben. Um die Wirkung der Volumenänderungen besser sichtbar zu machen, wurde den Bauelementen eine Struktur aus Unterelementen gegeben, welche die unterschiedlichen Volumenänderungen zeigen.

In Abbildung 4-6 a) erfolgt die Sicherung der Verbindung in den Freiheiten Translation in Richtung z und Rotation um x und y formschlüssig durch eine Normalkraft senkrecht zur Koppelstelle 1. Die Sicherung der Translation in Richtung x und der Rotation um z erfolgt kraftschlüssig durch Reibkräfte in dieser Koppelstelle. Im Beispiel soll ausschließlich der kraftschlüssige Verbindungsbestandteil betrachtet werden. Bei Volumenänderung der beteiligten Bauteile findet zur Anpassung in der Koppelstelle 1 eine undefinierte Relativbewegung statt. In welcher Art sich diese Relativbewegung auswirkt, ist nicht vorherzubestimmen und von den konkreten Reibverhältnissen abhängig. Für eine exemplarische Darstellung des Zustandes nach Temperaturänderung wurde in der rechten Abbildung davon ausgegangen, dass die Relativbewegung symmetrisch zur Mitte des Quaders stattfindet. Allgemein wird deutlich, dass bei Temperaturänderung und der Sicherung mit kraftschlüssigen Verbindungsbestandteilen ein undefinierter Zustand der Lagezuordnung entsteht. Dieser ist bei Rückkehr zur Bezugstemperatur T_0 nicht vollständig reversibel.

In Abbildung 4-6 b) erfolgt die Sicherung der betrachteten fünf Freiheiten formschlüssig durch Normalkräfte jeweils senkrecht zu den Koppelstellen und führt dazu, dass der Kontakt in den Koppelstellen auch unter Einfluss von Störgrößen erhalten bleibt. Die Lagezuordnung zwischen den Bauteilen bleibt auch unter Störgrößeneinfluss eindeutig bestimmt.

Abbildung 4-6 c) zeigt die Sicherung der Verbindung durch Kleben. Bei Temperaturen T oberhalb der Bezugstemperatur ist die thermische Dehnung des Klebers größer als die der beteiligten Bauteile. Durch die Ausdehnung des Klebers in Richtung x wird der Kontakt in der Koppelstelle 2 aufgehoben. Die

Ausdehnung des Klebers in Richtung z bewirkt eine Verkipfung des Quaders in Form einer Rotation um y . Hinsichtlich der Relativlage der beteiligten Bauteile ergibt sich ein undefinierter Zustand.

Anhand der dargestellten Beispiele lässt sich die Aussage machen, dass nur formschlüssige Verbindungsbestandteile die Lagezuordnung über mechanischen Koppelstellen sichern. Kraft- und stoffschlüssige Verbindungsbestandteile sichern zwar den körperlichen Zusammenhang der an der Verbindung beteiligten Bauteile, nicht zwangsläufig jedoch ihre gegenseitige Lagezuordnung.

4.6 Zusammenfassung

Die Gestaltung fester mechanischer Verbindungen ist eine wesentliche Aufgabe im Rahmen der Entwicklung technischer Gebilde. Allgemein lassen sich die Anforderungen an die Gestaltung wie folgt formulieren:

Feste mechanische Verbindungen sind so zu gestalten, dass durch ihre Eigenschaften die Funktion eines technischen Gebildes im Rahmen der Herstellung zielgerichtet erreicht und im Rahmen der Anwendung sicher gewährleistet wird.

Hierzu wurden durch den Autor allgemein bekannte und in zahlreichen Veröffentlichungen dokumentierte Informationen zum grundsätzlichen Aufbau mechanischer Verbindungen dargestellt und in ein geschlossenes Modell gebracht. Dieses Modell dient als Basis für die inhaltliche Arbeit in den nachfolgenden Kapiteln, wesentliche Aussagen dieses Modells werden im Folgenden zusammengefasst:

1. Feste mechanische Verbindungen dienen dem Zweck, Teile in unveränderlicher Relativlage miteinander zu verknüpfen.
2. Auf funktioneller Ebene ist eine mechanische Verbindung aus verschiedenen Funktionselementen mit spezifischen Eigenschaften aufgebaut.
3. Jede mechanische Verbindung ist aus einer oder mehreren Koppelstellen aufgebaut, in denen mechanische Wirkflächen in einem körperlichen Zusammenhang stehen.

4. In Rahmen der Gestaltung von Koppelstellen kann durch Nutzung von Festkörpergelenken eine Funktionstrennung zwischen dem mechanischen Kontakt der beteiligten Bauelemente und der Definition von Bewegungsfreiheiten vorgenommen werden.
5. Die Sicherung des körperlichen Zusammenhangs in Verbindungen kann durch Kraft-, Form- oder Stoffschluss erfolgen. Zur eindeutigen begrifflichen Trennung werden die zugehörigen Funktionselemente einer Verbindung als Verbindungsbestandteile bezeichnet.
6. Die qualitativen Eigenschaften jeder mechanischen Verbindung setzen sich aus den charakteristischen Eigenschaften der Koppelstellen, den charakteristischen Eigenschaften der zur Sicherung verwendeten Verbindungsbestandteile und dem Zusammenspiel dieser zusammen.
7. Aussage 6 kann genutzt werden, um mechanische Verbindungen objektiv hinsichtlich qualitativer Eigenschaften zu vergleichen und gezielt mechanische Verbindungen mit speziellen Eigenschaften zu konzipieren.

5 Herstellung und Anwendung von OHS kleiner Durchmesser

5.1 Herstellung

Im folgenden Kapitel wird der aktuelle Stand bei der Herstellung und Anwendung optischer Hochleistungssysteme kleiner Durchmesser dargestellt. Die Herstellung dieser Systeme erfolgt in einem mehrstufigen Prozess, dessen konkrete Detaillierung stark produktspezifisch ist. In Abbildung 5-1 ist eine verallgemeinerte Abfolge wesentlicher Prozessschritte der Herstellung und Nutzung gegeben. Anhand dieser Schritte sollen im Folgenden grundlegende Zusammenhänge dargestellt und hieraus Aussagen für die wissenschaftliche Auseinandersetzung im Sinne der Aufgabenstellung abgeleitet werden.

Die Fertigung der optischen und mechanischen Einzelteile erfolgt in mehreren Prozessschritten. Inhalt und Reihenfolge dieser Prozessschritte sind von den speziellen Anforderungen an diese Bauteile abhängig. Im Rahmen der Fertigung optischer Hochleistungsbauelemente finden Ur- oder Umformverfahren zur Erzeugung der Halbzeuge Anwendung. Die optischen Bauelemente selbst werden durch eine Abfolge von trennenden Verfahren wie

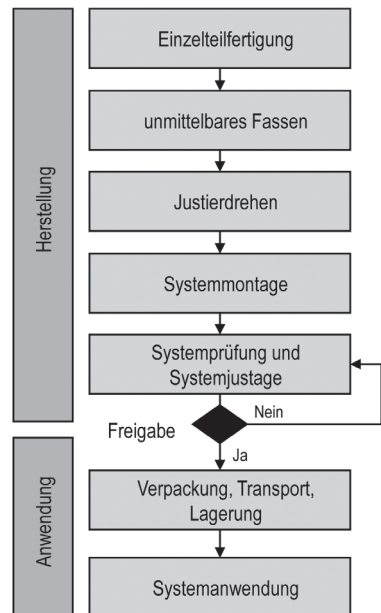


Abbildung 5-1

Prozesskette
der Herstellung
und Applikation
von OHS

Schleifen, Läppen, Polieren, Zentrieren und Korrekturpolierverfahren, beispielsweise CCP-Verfahren (CCP = Computer Controlled Polishing) Verfahren oder IBF-Verfahren (IBF = Ion Beam Figuring), hergestellt. Weitere wesentliche Prozessschritte sind Reinigungsverfahren und die Beschichtung sowie das Kitten zur Herstellung von Linsengruppen, sogenannten Kittgliedern. Da diese Verfahren nicht Bestandteil der Arbeit sind, wird auf die Literatur verwiesen [Blie08], [Karo04], [Jahr04], [Ullm09]. Die Herstellung der mechanischen Einzelteile erfolgt vorwiegend durch Drehbearbeitung in Kombination mit Wärmebehandlungsverfahren wie das spannungsarme Glühen und einer abschließenden werkstoffspezifischen Oberflächenbehandlung, beispielsweise Passivieren bei Edelstählen oder Eloxieren bei Aluminiumlegierungen.

Optische Hochleistungsbauelemente kommen in optischen Hochleistungssystemen immer mittelbar gefasst zum Einsatz [Fran08]. Die unmittelbar in Fassgliedern gefassten optischen Bauelemente werden hierzu über die mechanischen Schnittstellen des Fassgliedes mittelbar zu einem optischen System verbunden. Das unmittelbare Fassen erfolgt dabei vorrangig durch Kleben. Bereits in den 1970er Jahren wurde die hohe Bedeutung der Formgenauigkeit der optischen Wirkflächen in OHS erkannt. Zur Beherrschung von Formabweichungen durch das Fassen wurden die damals üblichen Verfahren „Fassen mittels Vorschraubring“ und „Gratfassen“ bei OHS durch Kleben der Linsen in die Fassung ersetzt [Guye88], weil diese Verfahren den gestiegenen Erfordernissen nicht mehr gerecht werden konnten. Die Technologie des Fassens durch Kleben wird bis heute eingesetzt, da sie gegenwärtig die besten Ergebnisse in Bezug auf Lagestabilität, Deformation und Spannungseintrag bietet [Fran08].

Dem Fassen nachfolgend findet der Schritt des Justierdrehens statt. Durch **Justierdrehen** wird ein Fassglied, in dem ein optisches Bauelement bzw. eine optische Baugruppe (z. B. Kittgruppe) unmittelbar gefasst ist, spanend so nachbearbeitet, dass für nachfolgende Prozessschritte geeignete radiale und axiale Fügeflächen entstehen. Die radialen Fügeflächen werden dabei durch die Bearbeitung konzentrisch zur optischen Achse des optischen Bauelementes ausgebildet und erhalten einen dem Füllzylinder angepassten Außendurchmesser. Die Herstellung der axialen Fügeflächen erfolgt so, dass diese senkrecht zur optischen Achse und in einem definierten axialen Abstand zu den Scheitelpunk-

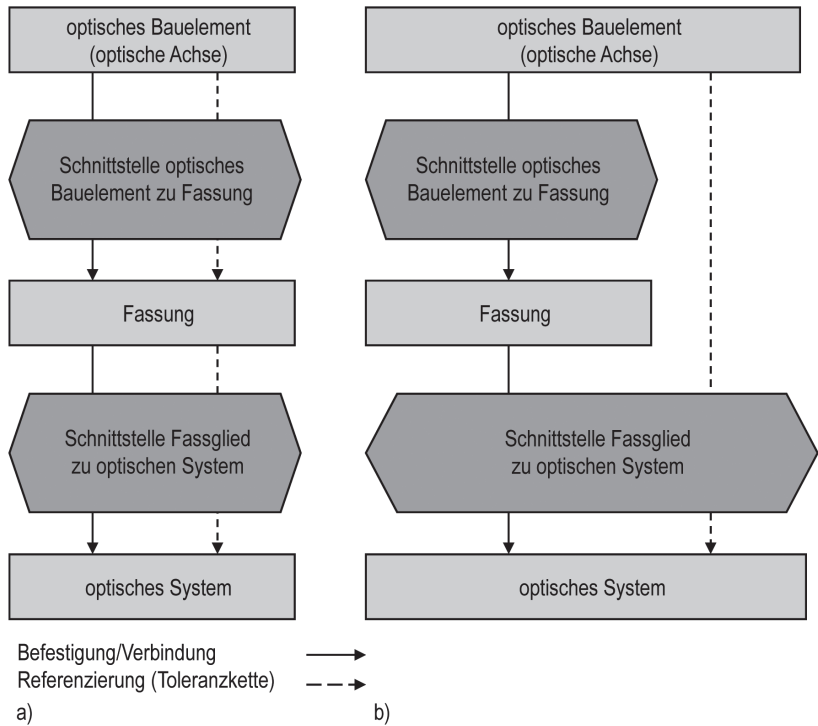


Abbildung 5-2 Referenzierung des optischen Bauelementes im optischen System a) ohne Justierdrehen b) mit Justierdrehen

ten des optischen Bauelementes liegen. Durch diese Bearbeitung lässt sich eine hochgenaue Lage der Fügeflächen des Fassgliedes zum optischen Bauelement herstellen. Wie in Abbildung 5-2 ersichtlich, kann damit die allgemeine Toleranzkette für die Referenzierung optischer Bauelemente in einem optischen System um die Schnittstelle optisches Bauelement – Fassung verkürzt werden. Erst durch diese Maßnahme werden OHS entsprechend den heutigen Anforderungen realisierbar. Das Justierdrehen bildet deshalb einen elementaren Technologiebaustein im gesamten Fertigungs- und Montageprozess für OHS kleiner Durchmesser. In OHS großer Durchmesser (z. B. Lithografieoptik) kann der

Schritt des Justierdrehens häufig wegen der vorherrschenden geometrischen Abmessungen und Massen nicht eingesetzt werden, hier finden spezielle Verfahren zum gerichteten Kleben Anwendung.

Im Anschluss an das Justierdrehen werden im Rahmen der **Systemmontage** die unmittelbar gefassten Einzelkomponenten zu einem Gesamtsystem verbunden. Der Aufbau des optischen Gesamtsystems ist bei OHS kleiner Durchmesser zumeist dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Fassglieder hintereinander und in Kombination mit Abstandsringen in einen Füllzylinder eingefüllt und mit einem Verschluss axial gesichert werden. Dieses Prinzip zum Aufbau optischer Systeme wird als **Füllfassungsprinzip** bezeichnet. Einer extrem engen Tolerierung bestimmter Parameter des optischen Bauelementes (Brechzahl, Mittendicke) und des Fassgliedes (Passfehler des gefassten optischen Bauelementes, Scheitelhöhen) sind technologische und wirtschaftliche Grenzen gesetzt. Deshalb kann bei anspruchsvollen optischen Systemen die geforderte Abbildungsfunktion häufig nur durch Kompensation der oben gegebenen Abweichungen realisiert werden. Hierzu werden die vorhandenen Kenngrößen des optischen Bauelementes und des Fassgliedes messtechnisch erfasst. Durch eine anschließende **Kombinationsrechnung** wird auf Basis dieser Kenngrößen ein individuelles optisches System berechnet und gefertigt. Zur Kompensation von Brechzahl-, Mittendicken- und Scheitelhöhenabweichungen nennt Frank Luftabstände als Variationsgröße im Rahmen der Kombinationsrechnung [Fran08]. In [Guye88] wird eine Passfehlerkombinationsrechnung vorgeschlagen, bei welcher die Passfehler gefasster optischer Bauelemente kompensiert werden können. Hierzu werden diese messtechnisch erfasst, zur Kompensation von nicht rotationssymmetrischen Fehlern können diese dann durch Variation der Drehlage der einzelnen Fassglieder so überlagert werden, dass sie sich in ihrer Gesamtwirkung zumindest teilweise kompensieren.

Durch die verbleibenden Abweichungen der bisher dargestellten Prozessschritte und im besonderen Maße durch das Fügenspiel beim Zentrieren der einzelnen Fassglieder im Füllzylinder kommt es trotz Kombinationsrechnung und individueller Systemmontage zu Restfehlern mit negativen Auswirkungen auf die Abbildungsgüte des optischen Systems. Deshalb wird im Anschluss an die Montage durch einen iterativen Prozess aus **Systemprüfung** und **System-**

justage eine Korrektur der verbliebenen optischen Restfehler durchgeführt. Für die Ermittlung von Bildfehlern im Rahmen der Systemprüfung sind verschiedene Verfahren Stand der Technik. In [HBMSW04] wird ein modifizierter Sterntest zur Systemprüfung vorgestellt. [Fisch00] nutzt die Abbildung eines Punktbildes und zieht daraus Rückschlüsse auf die Art der Bildfehler sowie die Größe und Richtung der Justierbewegungen. Als Justiermöglichkeiten stehen spezielle Schnittstellen zur Änderung von Luftabständen durch Austausch von Abstimmringen, das Verdrehen einzelner Fassglieder und Fassglieder mit lateraler Schiebemöglichkeit zur Verfügung [BoPa06], [HBMSW04]. Ein weiterer häufig bei Mikroskopobjektiven anzutreffender Justagevorgang ist der Bildstandlängenabgleich; hier wird die axiale Anlagefläche für die Montage des Objektivs im Mikroskop so abgestimmt, dass die Objektebene des Objektivs in einem genau definierten Abstand zu dieser steht.

Sind für das konkrete optische System die geforderten Spezifikationen erreicht, werden die Ergebnisse dokumentiert und es erfolgt die Systemfreigabe. Das optische System kann dann seiner Applikation zur Verfügung gestellt werden. Im Rahmen der Applikation spielen zum einen die **Einsatzbedingungen** und zum anderen die **Transportbedingungen** des Systems eine wichtige Rolle. Aus diesen leiten sich wesentliche Anforderungen für die konstruktive Gestaltung des optischen Systems ab. Die wichtigsten Umweltbedingungen sind Temperatur, äußere Kräfte wie Druck und Stoßbelastungen, Schwingungen, Feuchtigkeit, Kontaminationen und hochenergetische Strahlung, hinzu kommt als weitere Bedingung die festgelegte Lebensdauer des Systems. Je nach Einsatzspektrum des optischen Systems können diese Umweltbedingungen stark beschränkt (z. B. optische Systeme für Halbleiteranwendungen) oder stark erweitert (z. B. militärische Systeme, Weltraumanwendungen) sein. Unter den Einsatzbedingungen werden diejenigen Bedingungen verstanden, unter denen das optische System in der konkreten Anwendung zum Einsatz kommt und seine spezifizierten optischen Eigenschaften erfüllen muss. Unter den Transportbedingungen werden Extrembedingungen zusammengefasst, welche das optische System ohne bleibende Schäden überstehen muss. Diese sind beispielsweise in Transport- und Lagerspezifikationen festgelegt. Alle Veränderungen, die das optische System unter Transportbedingungen erfährt, müssen in dem

Sinne reversibel sein, dass anschließend unter Betriebsbedingungen wieder die spezifizierten optischen Eigenschaften erreicht werden.

Zusammenfassend können zur Beschreibung der Herstellung und Anwendung von OHS folgende Aussagen getroffen:

1. In optischen Hochleistungssystemen kann eindeutig zwischen unmittelbarem und mittelbarem Fassen sowie den zugehörigen Schnittstellen unterschieden werden.
2. In OHS kleiner und mittlerer Durchmesser stellt das Justierdrehen einen zentralen Prozessschritt dar. Durch das Justierdrehen kann die Toleranzkette für die Positionierung des optischen Bauelementes im System verkürzt werden (vgl. Abbildung 5-2).
3. Auf Basis der Aussagen 1 und 2 lässt sich hinsichtlich der Anforderungen an die konstruktive Gestaltung der Schnittstellen für das unmittelbare und mittelbare Fassen eine Funktionstrennung ableiten.
4. In der Schnittstelle für das unmittelbare Fassen des optischen Bauelementes (Schnittstelle optisches Bauelement zu Fassung) sind die Anforderungen hinsichtlich der Spannungsarmut zu erfüllen.
5. In der Schnittstelle für das mittelbare Fassen (Schnittstelle Fassglied zu optischem System) sind die Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit der Lagezuordnung zu erfüllen.
6. Die Montage optischer Hochleistungssysteme erfolgt so, dass Abweichungen aus den vorgelagerten Fertigungsschritten kompensiert werden; die Basis hierfür stellt eine Kombinationsrechnung dar.
7. Variationsgrößen für die Kombinationsrechnung sind Luftabstände und die Drehlage der optischen Bauelemente im System.
8. Nach der Montage des optischen Systems erfolgt die Systemjustage zur Minimierung der optischen Restfehler mithilfe speziell hierfür vorgesehener Justierstellen.
9. Für die Systemjustage finden laterale Schiebelinsen und die Änderung von Luftabständen und der Drehlage der optischen Bauelemente Anwendung.
10. Im Hinblick auf die Anwendung des optischen Systems kann zwischen Einsatz- und Transportbedingungen unterschieden werden.

11. Unter Einsatzbedingungen müssen festgelegte optische Eigenschaften erfüllt werden.
12. Veränderungen der Eigenschaften des optischen Systems unter Transportbedingungen müssen im Rahmen gegebener Spezifikationen reversibel sein.

5.2 Hintergrund – Objektive für die Masken- und Waferinspektion

Durch den rasanten Fortschritt im Bereich der Halbleitertechnik stellen Anwendungen in diesem Feld derzeit die höchsten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit optischer Systeme und bedingen deshalb eine stetige Weiterentwicklung dieser Systeme. Die Geschwindigkeit des Fortschritts wurde bereits im Jahr 1965 durch Gordon Moore vorhergesagt [MOOR65]. Die als Moores Law bekannte Aussage, dass sich die Anzahl der Transistoren auf einem Mikroprozessor alle 18 bis 24 Monate verdoppelt, hat bis heute ihre Gültigkeit. Die sich hieraus ergebenden Forderungen für die Produktionstechnik werden von Dachorganisationen wie der Sematech in Technologieroadmaps [ITRS07] dokumentiert und in ihrer technische Umsetzung kontinuierlich vorangetrieben.

Im Bereich der Halbleitertechnologie spielen optische Verfahren für die Qualitätskontrolle eine besondere Rolle. Optische Systeme für die Masken- und Waferinspektion bieten die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Prüfung mit hohem Durchsatz und gehören deshalb zu den Schlüsselementen in der Prozesskette der Halbleiterproduktion.

Die Produktionstechnologie für Halbleiterelemente setzt mit der Einführung der Immersions- und EUV-Lithografie ihren Weg in Richtung immer kleinerer Strukturen fort. Für die optische Qualitätskontrolle ergibt sich daraus die Aufgabe, diese stetig kleiner werdenden Strukturen objektgetreu abzubilden. Hierzu sind optische Systeme unter Verwendung von Beleuchtungen im tiefen UV-Spektralbereich (DUV) mit Wellenlängen bis 193 nm notwendig. Die genauen Charakteristiken der verwendeten Verfahren und Methoden sowie die aus ihnen resultierenden technischen Strukturen sind Inhalt zahlreicher Veröffentlichungen und nicht Bestandteil dieser Arbeit; hierzu wird beispielsweise auf [PBSSLT07], [KBAR08], [HSAKB09] verwiesen. Für Applikationen im DUV-

Bereich kommen spezielle Beleuchtungs- und Abbildungssysteme mit geringen Bandbreiten im Bereich der Arbeitswellenlänge zum Einsatz. Beispielsweise sind dies Quecksilberhochdrucklampen, Kryptonfluoridlaser oder Argonfluorid Excimer Laser für 193 nm Wellenlänge. Diese Systeme sind aus DUV-geeigneten optischen Substraten wie Quarzglas (SiO_2) und Calciumfluorid (CaF_2) aufgebaut. Aufgrund der starken wellenlängenabhängigen Brechungsindexänderung von Quarzglas im DUV-Bereich ist in DUV-Systemen auch bei monochromatischer Beleuchtung eine Korrektur chromatischer Fehler notwendig [Jahr04]. Im sichtbaren Spektralbereich erfolgt eine Korrektur chromatischer Fehler durch die Kombination von Materialien unterschiedlicher Brechungsindizes in verkitteten Linsengruppen, sogenannten Dubletten und Tripletten. In der DUV-Anwendung ist der Einsatz verkitteter Linsengruppen nicht möglich, da die derzeit verfügbaren organischen Feinkitte unter DUV-Strahlung nicht stabil sind. In diesen optischen Systemen sind Dubletten und Tripletten kittlos ausgeführt. Die kittlose Ausführung in Kombination mit einer auslegungsbedingten Abbildungsgüte von $\text{SR} > 95\%$ führt dazu, dass für die technische Realisierung von DUV-tauglichen optischen Systemen extreme Anforderungen an die Form und Lage der optischen Wirkflächen bestehen. Diese Anforderungen geben die Rahmenbedingungen für die Untersuchungen im Rahmen der Aufgabenstellung vor und sollen im folgenden Abschnitt dargestellt werden.

5.3 Anforderungen

Nach Hansen ist ein **System** ein abgegrenzter Teil der Wirklichkeit. Es hat Beziehungen zu seiner Umwelt, es hat eine Funktion und es hat eine **Struktur** [Hans74]. Um ein technisches System hinreichend zu beschreiben, besteht die Aufgabe, seine Umwelt, seine Funktion und seine Struktur eindeutig festzulegen. Umwelt und Funktion bestimmen im Rahmen dieser Arbeit die Anforderungen für die konstruktive Gestaltung der Struktur und sollen im Folgenden dargestellt werden.

Nach der in Kapitel 3.1 gegebenen Definition ist ein optisches System ein technisches Gebilde, dessen Aufgabe in der Realisierung einer spezifischen Ab-

bildungsfunktion liegt. Die Abbildungseigenschaften eines optischen Systems werden durch die Gestalt der optischen Bauelemente und durch ihre relative Anordnung zueinander bestimmt. Hinter dem Begriff Gestalt verbirgt sich hierbei die Gesamtheit aller geometrischen, stofflichen und Zustandseigenschaften eines technischen Gebildes [Sper82]. Hierbei sind für die konstruktive Gestaltung optischer Systeme die Form der optischen Wirkflächen und der Spannungszustand des optischen Bauelementes von besonderer Bedeutung. Die Festlegung funktionsrelevanter Anforderungen findet in optischen Systemen dementsprechend häufig durch diese Gestalteigenschaften und die relative Lage der optischen Bauelemente zueinander statt. Typische Forderungen für Form und Lage der optischen Bauelemente in OHS werden in [HBMSW04] und [SBHW05] am Beispiel eines konkreten optischen Design hergeleitet und sind im Folgenden dargestellt:

- **Passfehler** der optischen Fläche $< 30 \text{ nm pv}^3$,
- **Dezentrierung** der optischen Bauelemente zur Achse des Gesamtsystems $< 2 \text{ }\mu\text{m}$,
- **Verkipfung** der **optischen Achse**⁴ zur Achse des Gesamtsystems $< 0,3^\circ$ und
- **Luftabstandsabweichung** zwischen benachbarten optischen Bauelementen $< 2 \text{ }\mu\text{m}$.

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt dargestellt, kann in OHS eine Funktionstrennung zwischen unmittelbarem und mittelbarem Fassen vorgenommen werden. Dabei wurde die Funktionstrennung über die Begriffe Spannungsarmut und Genauigkeit der Lagezuordnung beschrieben. Die **Spannungs-**

3 Die pv-Abweichung (pv = peak to valley) ist die maximale Formabweichung der realen optischen Wirkfläche eines optischen Bauelementes von seiner Idealform.

4 Die optische Achse wird im Bereich der optischen Technologien allgemein als Bezug für die Beschreibung bestimmter Gestaltparameter optischer Bauelemente genutzt. Unter Betrachtung sphärischer optischer Wirkflächen ist sie durch die Verbindung der Krümmungsmittelpunkte eines zentrierten optischen Systems gegeben [Lex99], [Schr02], [DIN3140]. Der Begriff soll im Rahmen dieser Arbeit zur prozessübergreifenden Beschreibung des Zentrierzustandes Anwendung finden, weil sich mit Hilfe der optischen Achse Gestaltparameter prozessübergreifend referenzieren und beschreiben lassen.

armut kann über Form und Materialeigenschaften des optischen Bauelementes beschrieben werden, dies sind beispielsweise Parameter wie Passfehler und die Spannungsdoppelbrechung. Eine Beschreibung der **Genauigkeit der Lagezuordnung** erfolgt über Parameter wie Dezentrierung, Luftabstandsabweichung und Drehlage der optischen Bauelemente.

Eine Ableitung von OHS-typischen Anforderungen an die Spannungsarmut ist in [SoThe08] gegeben und soll kurz dargestellt werden. Zur Charakterisierung einer spannungsarmen Fassungstechnik wird hier das Gesamtbudget für den Passfehler auf einzelne Prozessschritte der Herstellung aufgeteilt; für das unmittelbare Fassen verbleibt in OHS ein Budget von $< 8 \text{ nm pv}$. Eine weitere Möglichkeit zur quantitativen Beschreibung einer spannungsarmen Fassungstechnik ist durch die Betrachtung der **Spannungsdoppelbrechung (SDB)** gegeben. Dabei wird der optische Gangunterschied im optischen Bauelement unter Einfluss von mechanischen Spannungen zur Charakterisierung genutzt; eine detaillierte Beschreibung ist beispielsweise in [Katt05] gegeben. Hier spricht [SoThe08] von einer spannungsarmen, OHS-geeigneten Fassungstechnik, wenn durch diese SDB Änderungen von $< 1 \text{ nm/cm}$ erreicht werden. Eine Beschreibung der Fassungstechnik durch die SDB hat den Vorteil, dass sie auf kommerziell verfügbaren Polarimetern in relativ einfacher Art und Weise nachgewiesen werden kann.

Zur Beschreibung der Umweltbedingungen wird zwischen Einsatz- und Transportbedingungen unterschieden. Abhängig von der Applikation des optischen Systems können diese stark beschränkt oder stark erweitert sein, detaillierte Ausführungen hierzu finden sich in [Vuko97], [Yod05]. Für die oben dargestellten Anforderungen aus dem Bereich optischer Systeme für die Halbleiterinspektion sind die Umweltbedingungen stark eingeschränkt.

Der Einsatz dieser OHS erfolgt in speziell isolierten Messkammern, diese verhindern Kontaminationen, den Eintrag von Kräften und Schwingungen. Durch spezielle Klimatisierung werden die Temperaturschwankungen auf $\pm 1 \text{ K}$ begrenzt [SMS06].

Für OHS sind die Transportbedingungen in der Regel durch spezielle Transportspezifikationen definiert. Typische Bedingungen sind:

Das unmittelbare und mittelbare Fassen optischer Bauelemente hat das Ziel		
die	geforderte Lagezuordnung zwischen den optischen Bauelementen im Rahmen der Montage zielgerichtet zu erreichen	geforderte Lagezuordnung zwischen den optischen Bauelementen über die Lebensdauer unter Einfluss definierter Störgrößen sicher zu gewährleisten
und dabei	die Form der optischen Wirkflächen	die Zustandseigenschaften der optischen Bauelemente
nicht zu beeinträchtigen.		

Abbildung 5-3 Qualitative Anforderungen an das unmittelbare und mittelbare Fassen

- **Temperaturbereich:** 10–35 °C,
- **relative Luftfeuchtigkeit:** max. 50 %,
- **Stoßbelastung:** max. 100 m/s² und
- **Druckbereich:** 500 bis 1.200 mbar.

Unmittelbares und mittelbares Fassen stellen Prozessschritte im Rahmen der Herstellung optischer Systeme dar, aus der Funktion optischer Systeme wurden oben quantitative Anforderungen an diese Prozessschritte in OHS ermittelt. Diese Anforderungen lassen sich in Form einer qualitativen Beschreibung auf das Fassen allgemein übertragen. Eine entsprechende Beschreibung in Form einer Übersicht ist in Abbildung 5-3 gegeben.

6 Unmittelbare Fassungstechnik

6.1 Einführung

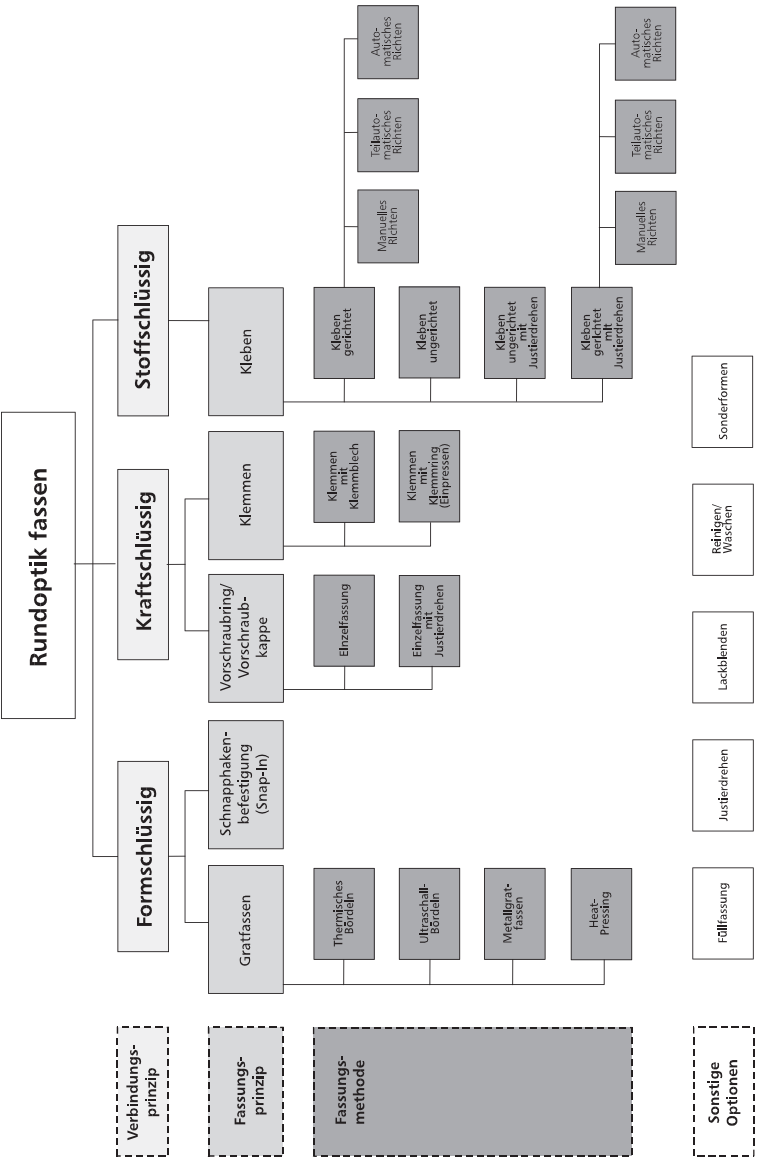
Der wissenschaftliche Stand zur **unmittelbaren Fassungstechnik** für optische Systeme kleiner Durchmesser und der hierfür verwendeten Strukturen ist im Wesentlichen durch Veröffentlichungen aus den 80er und 90er Jahren des vorigen Jahrhunderts bestimmt. Exemplarisch seien hier [Yod08], [Thes03], [Krau00], [Naum92], [Bösw90], [Guye88], [Grün85], [Guye79], [Kowa78] aufgeführt. Neuere Veröffentlichungen beziehen sich vorwiegend auf diese Quellen und entwickeln diese nur bedingt weiter [Fisch00], [Haut06], [Merk98]. Aufschluss über die Weiterentwicklung der Fassungstechnik lässt sich hauptsächlich in der Patentliteratur finden. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Sachrecherche in der Datenbank des Deutschen Patent- und Markenamtes (DPMA) zeigte allein für den Zeitraum 2000 bis 2009 über 100 neue Veröffentlichungen in den relevanten Patentklassen. Die Breite der hier zu verzeichnenden Lösungen ist im Rahmen dieser Arbeit nicht abzubilden, deshalb soll sich im Folgenden auf das Aufzeigen wesentlicher Entwicklungstendenzen beschränkt werden. Anlehnend an [Blie08] können in Abhängigkeit von der Fertigungsart drei Gruppen fassungstechnischer Lösungen in optischen Systemen verzeichnet werden. Dies sind die Gruppen Massenproduktion, Serienproduktion und Einzelfertigung. Die in diesen Gruppen eingesetzten Fassungstechniken weisen unterschiedliche Merkmale auf.

In der Gruppe der **Massenproduktion** sind Anwendungen mit niedriger bis mittlerer optischer Leistungsfähigkeit und Jahresstückzahlen > 10.000 zusammengefasst. Dies sind beispielsweise Anwendungen in Mobiltelefonen, Kompaktdigitalkameras oder Autoscheinwerfern. Hier sind die Entwicklungsanstrengungen kostengetrieben und an den Bedürfnissen der Massenproduktion ausgerichtet. Als wesentliche Tendenzen sind die Verwendung von Kunststoff

als Fassungs- und teilweise auch als optischer Werkstoff sowie das Fassen von ur- und umgeformten Bauteilen in vollständig automatisierten Prozessen zu verzeichnen [Hofm02], [BEBS05], [Cano06]. Verwendete Techniken wie Ultraschallbördeln, Heatmolding, Snap-In-Technologien und Klebverfahren sind stark spezialisiert und durch die hohen Stückzahlen wirtschaftlich.

In der Gruppe der **Serienproduktion** sind Anwendungen mittlerer und hoher optischer Leistungsfähigkeit mit Jahresstückzahlen zwischen 50 und 2.000 eingeordnet. Exemplarische Anwendungen sind Ferngläser oder Foto- und Mikroskopobjektive. In diesem Bereich werden vorwiegend die klassischen Fassungsmethoden nach Abbildung 6-1 angewandt. Die Auswahl der verwendeten Fassungstechniken findet in diesem Bereich im Spannungsfeld von Herstellungskosten und Leistungsfähigkeit statt. Da die Eigenschaften der klassischen Fassungstechniken die Bedürfnisse auf diesem Gebiet weitgehend abdecken, sind nur geringe Entwicklungstendenzen erkennbar. Dies ist beispielsweise die Entwicklung spezieller Klebstoffe oder von Fügeverfahren wie dem Laserstrahllöten. Auch ist die Überführung bzw. Nutzung von erfolgreichen Technologien aus den beiden anderen Gruppen erkennbar.

In der Gruppe der **Einzelfertigung** bzw. der wiederholten Einzelfertigung finden sich Systeme höchster optischer Leistungsfähigkeit. Die Jahresstückzahlen solcher Systeme sind sehr klein, Anwendungsfelder sind die Halbleiterlithografie, spezielle Laseranwendungen und wissenschaftliche Spezialanwendungen. Auf diesem Gebiet ist die Entwicklung im Allgemeinen an der Leistungsfähigkeit der Systeme ausgerichtet. Vor allem in der Halbleiterlithografie findet, angetrieben von kommerziellen Anforderungen, eine stetige Weiterentwicklung statt. Diese Weiterentwicklung führt zu konstruktiv extrem komplexen Systemen mit Fertigungstechnologien an der Grenze der technologischen Möglichkeiten. Als wesentliche Entwicklungstendenzen sind spannungsarme Fassungstechniken, DUV-stabile Fassungstechniken und Fassungstechniken mit integrierten Manipulatoren und Sensorik zu verzeichnen. Eine weitere wesentliche Tendenz ergibt sich aus der Entwicklung der EUV-Lithografie. Diese neue Art von optischen Systemen führt zu neuen konstruktiven Lösungen. Die geschilderten Entwicklungstendenzen lassen sich anhand einer sehr aktiven Patentlandschaft belegen, exemplarisch seien hier [Baci88], [Bold06], [Brun95],



Hierarchische Struktur der Zusammenhänge von Fassungstechniken der Rundoptik [Merk98]

Abbildung 6-1

6.2 Methodische Analyse

Die im vorigen Abschnitt gegebenen Darstellungen zeigen ein breites Feld an fassungstechnischen Lösungen. Mit aktuellen Betrachtungsweisen ist es nur unzureichend möglich, die Vielzahl an Lösungen hinsichtlich konkreter Eigenschaften objektiv zu analysieren und zu vergleichen. Hierfür wird im Folgenden eine **Methode** vorgeschlagen, welche die grundsätzlichen Eigenschaften vorhandener Verbindungsbestandteile nutzt, um Aussagen über Eigenschaften der Gesamtverbindung zu gewinnen. Die vorgeschlagene Methode besteht aus den drei in Abbildung 6-2 a) dargestellten Schritten und soll exemplarisch an der Analyse einer **Fassung mittels Vorschraubring** nach Abbildung 6-2 b) vorgestellt werden.

In Schritt 1 werden zunächst die mechanischen Koppelstellen der Verbindung und die von ihnen gesperrten Freiheiten ermittelt. Das Ergebnis von Schritt 1 der Analyse ist in Tabelle 6-1 dargestellt. Eine Übersicht der praktisch

Tabelle 6-1 Fassung mittels Vorschraubring



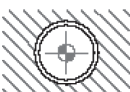
Schritt 1: Analyse der Koppelstellen							
Kombination von Wirkflächen	grafische Darstellung	gesperrte Freiheiten					
		Translation in			Rotation um		
		X	Y	Z	X	Y	Z
Koppelstelle 1 Wirkflächen: Kugel – Kegel (Sphärische Fläche d. Optik – Ringschneide d. Fassung)		x	x	x			
Koppelstelle 2 Wirkflächen: Kugel – Kegel (Sphärische Fläche d. Optik – Ringschneide d. Vorschraubings)		x	x	x			
Koppelstelle 3 Zylinder – Zylinder (Randzylinder Linse – Bohrung d. Fassung) mit Fügenspiel		ohne Wirkung, da durch Fügenspiel nicht im Eingriff					

Tabelle 6-2 Fassung mittels Vorschraubring

Schritt 2: Analyse der Sicherung

In den Koppelstellen 1 und 2 befinden sich Wirkflächen in mechanischem Kontakt. Die für eine Sicherung des Kontaktes in diesen Koppelstellen notwendige Normalkraft wird durch eine Verspannung der Koppelstellen gegeneinander erreicht. Dass dies möglich ist, setzt eine endliche Steifigkeit der Funktionselemente im zugehörigen Kraftkreis aus Fassung, Linse und Vorschraubring voraus. Durch die Koppelstellen 1 und 2 sind alle drei Translationen jeweils doppelt gesperrt. Die dadurch entstehende Überbestimmtheit wird in ihrer Auswirkung durch das Spiel in der Verbindung von Vorschraubring zu Fassung begrenzt, somit ergibt sich für die Betrachtung der drei Translationen ein zwangarmer Aufbau. Da die sphärischen Linsenflächen von Koppelstelle 1 und 2 keinen gemeinsamen Krümmungsmittelpunkt haben, sind durch Kombination der beiden Koppelstellen zusätzlich die beiden Rotationen um x und y durch Koppelstellen definiert. Durch das notwendige Fügspiel zwischen Linse und Fassung stehen in Koppelstelle 3 keine mechanischen Wirkflächen in definiertem Kontakt. (Wenn das Fügspiel in Koppelstelle 3 kleiner ist als das Spiel im Gewinde des Vorschraubrings, kommen auch in Koppelstelle 3 Wirkflächen in Kontakt und es ergeben sich zusätzliche Überbestimmtheiten.) Die Rotation um die z-Achse wird durch keine der Koppelstellen definiert, sondern nur durch Reibung in den Koppelstellen 1 und 2 gesichert.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich in der dargestellten Fassung mittels Vorschraubring form- und kraftschlüssige Verbindungsbestandteile im Eingriff finden.

vorkommenden Kombinationen von Wirkflächen und ihrer Bewegungsfreiheiten findet sich in Kapitel 4.3, Abbildung 4-1.

Im Schritt 2 erfolgt eine Analyse der Sicherung und eine Einordnung der hierfür verwendeten Funktionselemente in kraft-, form- und stoffschlüssige Verbindungsbestandteile. Wie bereits in Kapitel 4 dargestellt, ist die Sicherung unter zwei Gesichtspunkten zu betrachten: dem der Sicherung des Wirkflächenkontakts in den Koppelstellen und dem der Sicherung der verbleibenden Bewegungsfreiheiten, sodass sich $F=0$ ergibt. Das Ergebnis für eine Fassung mittels Vorschraubring ist in Tabelle 6-2 dargestellt.

Mithilfe der beiden ersten Schritte ist anhand objektiver, auf jedes Fassungssystem anwendbarer Kriterien der grundsätzliche Aufbau der Verbindung beschrieben. Im 3. Schritt erfolgt die Ableitung konkreter Eigenschaften bzw. die Bewertung hinsichtlich konkreter Anforderungen. Für die gegebene Anordnung ist eine Bewertung entsprechend der für die unmittelbare Fassungstechnik im Rahmen dieser Arbeit wichtigen Kriterien Spannungsarmut und Lagestabilität

Tabelle 6-3 Fassung mittels Vorschraubring

Schritt 3: Bewertung
Spannungsarmut
<p>Die Anordnung der Koppelstellen ergibt einen in den drei Freiheiten der Translation überbestimmten Aufbau. Die entstehenden Zwangskräfte werden durch das Spiel in der Schnittstelle Vorschraubring – Fassung reduziert.</p> <p>Die Sicherung der Koppelstellen erfolgt durch eine Normalkraft. Da der Kraftkreis für diese eine sehr hohe Steifigkeit besitzt, können bei geringen relativen Längenänderungen der Elemente im Kraftkreis (durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten bei Temperaturgang) sehr hohe Kräfte entstehen. Da das optische Bauelement Teil des Kraftkreises ist, wirken diese Kräfte direkt auf das optische Bauelement.</p> <p>In der Wirkflächenkombination Kugel – Kegel der Koppelstellen 1 und 2 liegt im idealisierten Zustand eine Linienberührung vor. Stets vorhandene Fertigungsabweichungen der Wirkflächen von der Sollform haben undefinierte Berührungszustände zur Folge, diese führen unter Einwirkung der Sicherungskraft zu Spannungen und Deformation in den beteiligten Bauelementen.</p> <p>Die Sicherung der Freiheit Rotation um die optische Achse erfolgt durch kraftschlüssige Verbindungsbestandteile. Die hierfür notwendige Normalkraft ist entsprechend Gl. 4-4 deutlich höher als die im Betrieb auftretenden Kräfte und muss durch die nur bedingt quantifizierbaren Reibzustände in den Koppelstellen mit einem hohen Sicherheitsfaktor belegt werden.</p> <p>Fazit: Durch die kraftschlüssigen Verbindungsbestandteile sind zur Sicherung der Verbindung hohe Normalkräfte notwendig. Diese wirken direkt auf das optische Bauelement ein und werden durch Fertigungsabweichungen der mechanischen Wirkflächen und unter Einfluss von Temperaturgang noch verstärkt. Das Fassen mittels Vorschraubring ist für unmittelbares Fassen in OHS nicht geeignet.</p>
Lagestabilität
<p>Die Verbindung enthält keine Funktionselemente, welche empfindlich auf DUV Strahlung oder auf Änderung der rel. Luftfeuchtigkeit reagieren.</p> <p>Bei Temperaturgang finden aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten α relative Längenänderungen der beteiligten Bauteile statt. Diese führen durch die hohe Steifigkeit des Kraftkreises für die Sicherung schon bei kleinen ΔT zu einem undefinierten Zustand der Lagezuordnung in axialer Richtung. In radialer Richtung finden gleitreibungsbehaftete Relativbewegungen in den Koppelstellen statt, welche nicht vollständig reversibel sind.</p> <p>Fazit: Aufgrund des Spiels und der reibungsbehafteten Relativbewegungen bei Temperaturgang ist das Fassen mittels Vorschraubring für lagestabiles Fassen in OHS nicht geeignet.</p>

in Tabelle 6-3 dargestellt. Die Eigenschaften bezüglich der gegebenen Kriterien lassen sich direkt aus den Eigenschaften der vorliegenden Funktionselemente (Koppelstellen, form- und kraftschlüssige Verbindungsbestandteile) ableiten.

Das Fassen mittels Vorschraubring zählt entsprechend der klassischen Einordnung nach Abbildung 6-1 zu den kraftschlüssigen Fassungstechniken. Die vorgenommene Analyse stellt durch ihre differenzierte Betrachtung einzelner Funktionselemente der Verbindung eine Präzisierung der bisherigen Einordnung vor. Die Verbindung ist in fünf Freiheiten durch formschlüssige Verbindungsbestandteile und in einer Freiheit (Rotation um z) durch kraftschlüssige Verbindungsbestandteile gesichert. Auf Basis der ermittelten qualitativen Eigenschaften ist das unmittelbare Fassen mittels Vorschraubring für eine spannungsarme, lagestabile Verbindung von optischem Bauelement und Fassung in OHS nicht geeignet. Diese Aussage ist allgemein bekannt und beispielsweise in [Guye88] veröffentlicht. Eine Begründung für diese Aussage wurde bisher in der Literatur nur durch experimentelle Ergebnisse gegeben, konnte aber mit der vorliegenden Untersuchung auch methodisch anhand eindeutiger Kriterien geliefert werden. Die durchgeführte methodische Untersuchung bietet auch die Möglichkeit, konkrete Schwachstellen zu identifizieren und darauf aufbauend Verbesserungsmöglichkeiten abzuleiten. Hierauf wird an dieser Stelle verzichtet.

Die durch den Autor vorgeschlagene Methode bietet die Möglichkeit, auf einem stark formalisierten Weg die bisherigen Einordnungen von Fassungstechniken zu präzisieren und im Sinne der Zuordnung konkreter Eigenschaften zu erweitern. Für die praktische Anwendung stellt sie damit ein Werkzeug dar, die im Konstruktionsalltag stark subjektiv geprägte Analyse und Bewertung zu ergänzen und durch ihre allgemeine Anwendbarkeit transparent und vergleichbar zu gestalten. Diese Methode wird in den folgenden Kapiteln eingesetzt, um den Stand der Technik zu bewerten und gezielt Möglichkeiten für dessen Weiterentwicklung abzuleiten.

6.3 Stand der Technik

Optische Bauelemente kleiner Durchmesser werden in optischen Hochleistungssystemen überwiegend durch Kleben gefasst. Diese Fassungs-technik unterliegt seit ihrer Einführung in die Fertigung von Hochleistungsoptik (beispielsweise dokumentiert in [Guye88]) einem kontinuierlichen Optimierungs- und Verbesserungsprozess. Verbesserungen wurden im Wesentlichen durch die Gestaltung der Klebenut, die verwendeten Kleber und die Prozessführung beim Kleben erreicht. Beim **Fassen durch Kleben** sitzt das optische Bauelement in einer Fassungsbohrung und liegt axial mit der optisch wirksamen Fläche oder einer eigens dafür vorgesehenen Funktionsfläche (z. B. Plan- oder Kegelfase) an einer axialen Funktionsfläche der Fassung (z. B. Ringschneide oder Planfläche) an. Die Klebung selbst findet am Linsenaußenzylinder (Umfangsklebung) oder gegenüber der axialen Anlagefläche (Ringklebung) statt [Fran08]. Vertiefende Informationen zu Anwendung und Charakteristik von Klebeverbindungen in der Optikfertigung finden sich in [Blie08].

Hinsichtlich der Anwendbarkeit in optischen Hochleistungssystemen stößt das Kleben zunehmend an seine Grenzen. Anforderungen, wie sie in Kapitel 5.3 dargestellt sind, lassen sich nicht mehr sicher erfüllen. Die Ursache liegt zum einen in der mangelnden DUV-Stabilität aktuell verfügbarer Klebstoffe und zum anderen in den grundsätzlichen Eigenschaften des Fügeverfahrens Kleben. Wesentliche Anforderungen für den Einsatz in optischen Hochleistungssystemen sind die Spannungsarmut sowie die Lage- und Langzeitstabilität. Diese Eigenschaften erweisen sich bei der Gestaltung der Klebeverbindung als einander entgegengesetzt. Zur Erzeugung einer möglichst geringen Kraftwirkung auf das optische Element, verursacht durch Schrumpfung beim Aushärten oder Veränderungen im Klebstoff durch Störgrößen, werden Klebstoffe mit geringer Steifigkeit, sogenannte weiche Klebstoffe verwendet. In der Praxis verfügbare weiche Klebstoffe sind jedoch besonders empfindlich gegen Störgrößen und deshalb hinsichtlich ihrer Lagestabilität limitiert.

Der grundsätzliche Aufbau einer durch eine Ringklebung gefassten Optik ist in Abbildung 6-3 dargestellt.

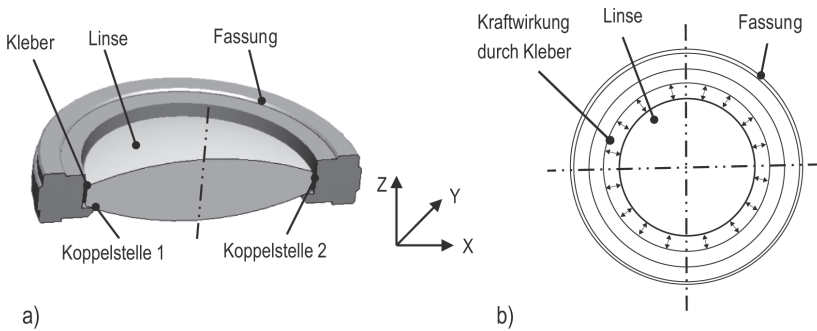


Abbildung 6-3 Fassglied geklebt a) konstruktiver Aufbau b) schematische Wirkungsweise


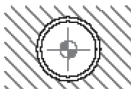
Im Folgenden wird ein Fassglied nach Abbildung 6-3 anhand der im vorigen Abschnitt eingeführten Methode hinsichtlich der Eigenschaften Spannungsarmut und Lagestabilität untersucht. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Tabelle 6-4 dargestellt.

Aus der Praxis ist bekannt, dass Klebeverbindungen nach dem Stand der Technik nur mit weichen Klebstoffen spannungsarm zu gestalten sind. Dies lässt sich anhand der durchgeführten Analyse schlüssig erklären, darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass Klebeverbindungen nach dem Stand der Technik hinsichtlich ihrer Lagestabilität limitiert sind.

Unabhängig davon lassen sich allgemein für den Einsatz derartiger Verbindungen in optischen Systemen folgende Aussagen ableiten:

- Die Verwendung von Klebern geringer Steifigkeit ist hinsichtlich der Spannungsarmut vorteilhaft, da in Klebungen immer vorhandene Spannungszustände nur kleine Kräfte auf das optische Bauelement hervorrufen.
- Die Lagedefinition zwischen optischem Bauelement und Fassung erfolgt über ein Kräftegleichgewicht, in dem der Kleber das funktionsbestimmende Element darstellt. Veränderungen im Kräftegleichgewicht führen zur Änderung der Relativlage von optischem Bauelement und Fassung.

Tabelle 6-4 Analyse – geklebte Fassungstechnologie

Schritt 1: Analyse der Koppelstellen							
Kombination von Wirkflächen	grafische Darstellung	gesperzte Freiheiten					
		Translation in			Rotation um		
		X	Y	Z	X	Y	Z
Koppelstelle 1 Wirkflächen: Kugel – Kegel (Sphärische Fläche d. Optik – Ringschneide d. Fassung)		x	x	x			
Koppelstelle 2 Wirkflächen: Zylinder – Zylinder (Randzylinder Linse – Bohrung d. Fassung) durch Kleber spielfrei		x	x		x	x	

Schritt 2: Analyse der Sicherung
In der Verbindung sind die Fügerichtung entlang der Achse des Fassglandes und die Freiheit Rotation um z zu sichern. Die Sicherung erfolgt über einen stoffschlüssigen Verbindungsbestandteil, durch Kleben.

Schritt 3: Bewertung
Spannungsgarmut
<p>Betrachtet man zunächst nur die Koppelstellen der Verbindung und den Kleber in diesem Rahmen nur als federndes Element, mit welchem die Koppelstelle Zylinder – Zylinder spielfrei gestaltet wird, ergibt sich eine Überbestimmtheit der Anordnung in den Translationen entlang der x- und der y-Achse. Da sich der Kleber im Rahmen der Herstellung der Verbindung den vorliegenden Verhältnissen im Klebespalt anpasst, kann man in diesem Zusammenhang von einem zwangarmen Aufbau sprechen. Unter Einfluss von Störgrößen bleibt die Anpassungsfähigkeit der Anordnung und damit die Zwangarmut nur erhalten, wenn der Kleber eine geringe Steifigkeit hat.</p> <p>Betrachtet man den Kleber als organischen Fügehilfsstoff, führen die in Klebeverbindungen immer vorhandenen Spannungszustände (vgl. Kapitel 4.4) zu Rückwirkungen auf das optische Bauelement. Die wesentlichen Ursachen für Spannungszustände sind Volumenänderungen des Klebstoffs zum einen beim Aushärten und zum anderen unter Einfluss von Störgrößen, hierbei insbesondere von Temperaturgang und der Änderung der relativen Luftfeuchte. Abhängig von der Steifigkeit des Klebers führen diese Volumenänderungen zu Kräften. Wie in Abbildung 6-3 ersichtlich, wird der Kraftkreis für die Aufnahme dieser Kräfte direkt über das optische Bauelement geschlossen.</p> <p>Fazit: Die Sicherung der Verbindung mit Kleber ist aufgrund ihrer Überbestimmtheit und der in Klebeverbindungen immer vorhandenen Spannungszustände für die Anwendung in OHS nur bei Verwendung von Klebern mit geringer Steifigkeit geeignet.</p>

Tabelle 6-4 Analyse – geklebte Fassungstechnologie (Fortsetzung)

Lagestabilität
<p>Die Relativlage zwischen optischem Bauelement und Fassung ist in mehreren Freiheiten über den Kleber definiert. Der Kleber selbst ist ein Funktionselement, dessen Eigenschaften sehr stark auf den Einfluss von Störgrößen reagieren; wesentliche Störgrößen sind Temperaturgang, relative Luftfeuchte und hochenergetische Strahlung. Das Aushärten des Klebers führt zu einem Kräftegleichgewicht, der zugehörige Kraftkreis besteht aus Fassung, optischem Bauelement und Kleber. Ändert sich durch Einfluss von Störgrößen das Kräftegleichgewicht, führt dies zu Relativbewegungen zwischen optischem Bauelement und Fassung. Betrachtet man die in Abbildung 6-3 b) dargestellten umlaufend zwischen optischem Bauelement und Fassung wirkenden Kräfte, so ändert sich das Kräftegleichgewicht nur, wenn sich diese Kräfte unter Einfluss von Störgrößen nicht ideal gleichmäßig ändern. Praktisch nicht zu vermeidende Ursachen hierfür sind ein ungleichmäßiger Klebespalt, in Klebstoffen immer vorhandene Inhomogenitäten, inhomogen wirkende Störgrößen (z.B. ungleichmäßiger Wärmeeintrag), ungleichmäßige Wärmeabfuhr und unsymmetrisch angreifende äußere Kräfte wie beispielsweise eine vertikale Einbaulage des Systems.</p>
Schritt 3: Bewertung
Lagestabilität
<p>Durch die hohe Strahlungsenergie von DUV-Strahlung, welche im Bereich der Bindungsenergie der organischen Bestandteile des Klebers liegt, werden aktuell verfügbare Klebstoffe bei Anwendung im Bereich des Strahlengangs von DUV-Systemen bereits nach kurzer Zeit zerstört.</p> <p>Fazit: Die Verwendung von Klebern in OHS, insbesondere in DUV-Systemen, ist durch die gegebenen Einschränkungen nur noch begrenzt prozesssicher.</p>

- Durch Inhomogenitäten hervorgerufene Änderungen des Kräftegleichgewichts sind durch gleichmäßigen Klebespalt und Verwendung homogener Klebstoffe (blasenfrei, gleichmäßige Korngrößenverteilung bei Klebstoffen mit Füllstoffanteil) zu minimieren.
- Durch die Anwendung des Systems verursachte Änderungen des Kräftegleichgewichts sind zu minimieren, z.B. durch Verhinderung von ungleichmäßigem Wärmeeintrag oder Wärmeabfuhr und ungleichmäßig angreifende äußere Kräfte.
- Die Auswirkung von Änderungen des Kräftegleichgewichts sind zu minimieren, z.B. im Rahmen der Systemmontage durch Justierung des Systems in Gebrauchslage.

Mit der Analyse des Standes der Technik konnte dargestellt werden, dass die hier vorgeschlagene Betrachtungsweise mechanischer Verbindungen aus der Praxis bekannte Eigenschaften schlüssig erklärt. Darüber hinaus zeigt sie konkrete Schwachstellen auf und liefert damit Ansatzpunkte für die gezielte Weiterentwicklung.

6.4 Lösungsraum

6.4.1 Einführung

Im Folgenden soll zunächst allgemein ein Lösungsraum für die Gestaltung mechanischer Verbindungen zwischen optischem Bauelement und Fassung erarbeitet werden. Aus diesem können anschließend Lösungen abgeleitet werden, welche für das unmittelbare Fassen in optischen Hochleistungssystemen geeignet sind.

Im Bereich der Konstruktionswissenschaften finden sowohl intuitive als auch diskursive Vorgehensweisen zur Erschließung neuer Lösungen Anwendung. Intuitiv geprägte Methoden sind stark vom Bearbeiter abhängig. Der fachliche Horizont kann sich beispielsweise hinsichtlich des Lösungsraumes als einschränkend erweisen. Um dem Ziel dieser Arbeit, einen vollständigen Lösungsraum zu erschließen, gerecht zu werden, empfiehlt sich deshalb eine diskursive, systematische Vorgehensweise. Diese hat den Vorteil, dass sie intuitive Lösungen abbilden und einordnen kann, durch systematisches Vorgehen aber einseitige Betrachtungsweisen verhindert und dadurch eine gleichmäßige Überdeckung des Lösungsfeldes erreicht werden kann. In [PaBei05] wird dieses Vorgehen als Methode des Systematisierens bezeichnet. Bei Vorliegen von kennzeichnenden Merkmalen ist es möglich, durch systematische Variation dieser Merkmale ein vollständiges Lösungsfeld zu erarbeiten. Eine Darstellung von Methoden zur Variation und Struktursynthese im Rahmen des konstruktiven Entwicklungsprozesses findet sich in [Höhn83]. Ein im Sinne des gesuchten Lösungsfeldes geeignetes charakterisierendes Merkmal ist dadurch gekennzeichnet, dass es eine Abstraktion aufweist, die die vollständige Erfassung aller Lösungen

ermöglicht. Im Rahmen dieser Vorgehensweise stellt das Finden dieser Merkmale auf einem zielführenden Abstraktionsniveau die eigentliche schöpferische Aufgabe dar. Anhand der Merkmale wird anschließend das Lösungsfeld systematisch mithilfe einer stark formalistischen Vorgehensweise erarbeitet.

Zur Ermittlung eines Lösungsraumes für das unmittelbare Fassen optischer Bauelemente bietet sich die Nutzung des in Kapitel 4 entwickelten Modells mechanischer Verbindungen an. Das Modell beruht auf der Betrachtung konkreter Merkmale in Form von Funktionselementen, diese können systematisch variiert und zu neuen Lösungen kombiniert werden. Die in Abschnitt 4 gewählte Betrachtung der einzelnen Funktionselemente unter den Oberbegriffen Koppelstellen und Sicherung soll hier abgewandelt Anwendung finden. In mechanischen Verbindungen finden sich als Funktionselemente die in Kontakt stehenden mechanischen Wirkflächen und die Verbindungsbestandteile zum Sichern. Ein Wirkflächenpaar wird dabei als Koppelstelle bezeichnet. Die Kombination der Koppelstellen ergibt die mechanische Schnittstelle und das Zusammenwirken von mechanischer Schnittstelle und der Sicherung bildet die mechanische Verbindung selbst (vgl. auch Abbildung 3-3). In Anknüpfung an diese Einordnung gliedert sich der Lösungsraum für den Aufbau mechanischer Verbindungen schematisch entsprechend Abbildung 6-4 und soll im Folgenden systematisch erarbeitet werden.

Für die konstruktive Umsetzung des Lösungsraumes ist die Beachtung der von Schilling in [Schill82] vorgestellten Konstruktionsprinzipien der Gerätetechnik zweckmäßig. Ihre Anwendung auf das unmittelbare Fassen optischer

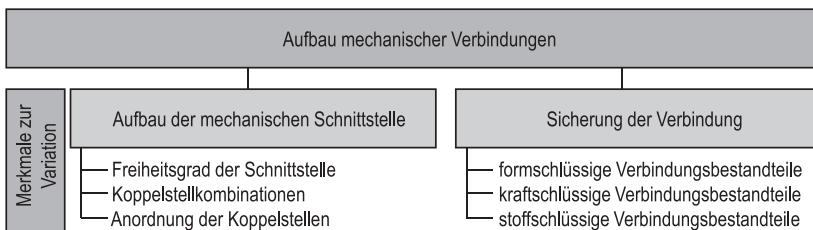


Abbildung 6-4 Schematischer Aufbau des Lösungsraumes für die Gestaltung mechanischer Verbindungen

Bauelemente soll in einem eigenen Abschnitt im Anschluss an die Entwicklung des Lösungsraumes demonstriert werden.

6.4.2 Aufbau der mechanischen Schnittstelle

Für den Aufbau der Schnittstelle stehen verschiedene charakteristische Merkmale zur Verfügung, die sich zur Variation eignen. Im Rahmen dieser Arbeit finden die Merkmale entsprechend Abbildung 6-4 Anwendung. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 6-5 dargestellt und soll kurz erklärt werden.

Im Rahmen der konkreten Variation wurde von einem festgelegten Freiheitsgrad der Schnittstelle aus die Kombination an Koppelstellen variiert, mit

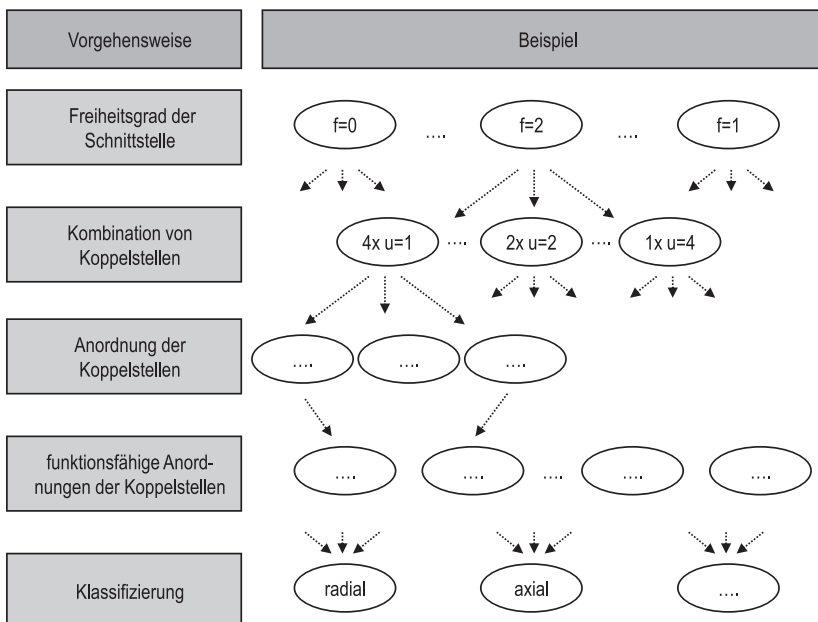


Abbildung 6-5 Vorgehensweise bei der systematischen Untersuchung von Koppelstellen zur Gestaltung mechanischer Verbindungen

welchen die entsprechenden Unfreiheiten erzeugt werden können. Hierzu wurde davon ausgegangen, dass sich in festen mechanischen Verbindungen nach dem Sichern ein Freiheitsgrad von $F = 0$ ergibt. Deshalb wurde der Variationsbereich von $u = 1$ bis $u = 6$ begrenzt. Die untere Grenze von $u = 1$ ergibt sich zwangsläufig, da die Wirkflächen von mindestens zwei verschiedenen Bauelementen in Kontakt stehen und dieser Kontakt bei punktförmiger Berührung mindestens eine Translation sperrt. Die gewählte obere Grenze von $u = 6$ wurde festgelegt, um die Verbindung zwangsfrei zu gestalten. Im Anschluss an die Variation der Koppelstellen erfolgt die Untersuchung der möglichen Anordnungen dieser Koppelstellen in den drei Ebenen eines kartesischen Koordinatensystems. Die Vielzahl der sich hieraus ergebenden Varianten wurde nachfolgend hinsichtlich der Funktionsfähigkeit geprüft. Dabei wurde ermittelt, welche Anordnungen tatsächlich den angestrebten Freiheitsgrad der Schnittstelle erzeugen. Anordnungen, die bestimmte Freiheiten doppelt und andere Freiheiten nicht sperren, entfallen in diesem Schritt. Um die Menge der entstandenen Lösungen praktisch anwendbar zu machen, wurde im letzten Schritt eine Klassifizierung der gefundenen Lösungen vorgenommen. Hierbei wurden Klassen unter unterschiedlichen Gesichtspunkten festgelegt, z. B. dem der Anzahl der gesperrten Freiheiten ($u = 1$ bis $u = 6$), dem der Art der gesperrten Freiheiten (Translation, Rotation etc.), dem der Anordnung der Koppelstellen für die Anwendung zum Fassen optischer Bauelemente (radial, axial, Kombination aus beiden).

Die systematische Ermittlung des Lösungsraumes wurde im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen und ist in [Mooz07] dokumentiert. Der entstandene Koppelstellenkatalog umfasst mit über 260 verschiedenen Anordnungen das vollständige Lösungsfeld für die Gestaltung mechanischer Schnittstellen mit $u = 3$ bis $u = 6$, Schnittstellen mit $u = 1$ und $u = 2$ wurden aufgrund ihrer mangelnden praktischen Relevanz für die Zwecke dieser Arbeit nicht aufgeführt.

6.4.3 Sicherung der Verbindung

Im Mittelpunkt dieses Abschnitts steht die Diskussion kraft-, form- und stoffschlüssiger Verbindungsbestandteile hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zum

unmittelbaren Fassen in OHS. Wo notwendig, wird auf die fgetechnologischen Verfahren zur Erzeugung der Verbindungsbestandteile eingegangen. Für die Betrachtung stehen die Gesichtspunkte Spannungsarmut und Lagestabilität im Vordergrund. Diese Eigenschaften werden im Rahmen der Herstellung und unter Einfluss von Störgrößen untersucht. Für die Diskussion der Eigenschaften unter Störgrößeneinfluss wurde ein allgemeines Wirkschema formuliert. Dieses Schema ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Für die Anwendung optischer Hochleistungssysteme relevante Störgrößen sind Temperaturgang, Änderungen der relativen Feuchtigkeit und Strahlung. Der vollständige Lösungsraum für diese Teilaufgabe ist durch alle Fügeverfahren in [DIN8593] gegeben. Die folgende Darstellung bezieht sich jedoch nur auf aus aktueller Sicht praktisch anwendbare Verfahren.

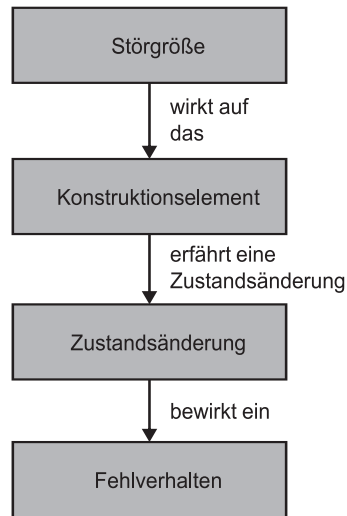


Abbildung 6-6 Allgemeines Wirkschema für den Einfluss von Störgrößen

Kraftschlüssige Verbindungsbestandteile

Eine Darstellung der grundsätzlichen Eigenschaften kraftschlüssiger Verbindungsbestandteile erfolgte in Abschnitt 4.4. Für das Fassen optischer Bauelemente lassen sich aus den prinzipbedingten Eigenschaften folgende Rückwirkungen ableiten.

Kraftschlüssige Verbindungsbestandteile benötigen immer eine wirkende Normalkraft; da diese Normalkraft nicht direkt, sondern über Reibung wirkt, muss diese Normalkraft vergleichsweise hoch sein.

Der Kraftkreis zur Sicherung wird immer durch die beteiligten Bauelemente geschlossen, das heißt, auch durch das optische Bauelement. Eine Verringe-

rung der zur Sicherung notwendigen Normalkräfte kann durch die Erhöhung des Reibwertes erreicht werden. Zur Verringerung der Auswirkungen der wirkenden Normalkräfte können die Prinzipien des Kraftflusses nach Schilling, dargestellt in [Schil82] Anwendung finden, die Vorstellung konkreter Lösungen erfolgt im nächsten Abschnitt.

In kraftschlüssig gesicherten Bewegungsfreiheiten liegt keine durch mechanische Wirkflächen definierte Lage vor, sondern die kraftschlüssig gesicherte Position wird nur mittels geeigneter Maßnahmen (Vorrichtungen, Justierung) eingestellt und anschließend durch Reibwirkung gesichert. Temporäre Veränderungen des Kräftegleichgewichtes durch Störgrößen führen zu gleitreibungsbehafteten Relativbewegungen in den Koppelstellen [Bans05]. Diese reibungsbehafteten Bewegungen zwischen den verbundenen Elementen sind nicht vollständig reversibel, da keine eindeutige Definition für die Relativlagen vorliegt.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass kraftschlüssige Verbindungsbestandteile zum unmittelbaren Fassen in OHS nicht geeignet sind. Für das mittelbare Fassen stellen kraftschlüssige Verbindungsbestandteile eine geeignete Lösung dar, da hier die notwendigen Normalkräfte zur Sicherung in den mechanischen Bauteilen wirken und durch konstruktive Maßnahmen beherrscht werden können. Durch mechanische Wirkflächen nicht gesperrte Freiheiten können in diesem Zusammenhang für die Justage genutzt werden.

Formschlüssige Verbindungsbestandteile

Die Anwendung formschlüssiger Verbindungsbestandteile setzt definitionsgemäß (vgl. Kapitel 4.4) eine Lagedefinition zwischen den an der Verbindung beteiligten Bauteilen über mechanische Wirkflächen voraus. Die Lagedefinition kann sich dabei auf die formschlüssig zu sichernden Freiheiten beschränken, dies müssen nicht zwangsläufig alle sechs Bewegungsfreiheiten sein. Die Sicherung durch formschlüssige Verbindungsbestandteile hat die Aufgabe, den Kontakt in den mechanischen Wirkflächen sicherzustellen; hierzu sind Kräfte oder Kraftkomponenten notwendig, welche senkrecht zu den zu sichernden Wirkflächen angreifen. Für das Fassen optischer Bauelemente lassen sich aus

den prinzipbedingten Eigenschaften und der Darstellung in Abschnitt 4.4 folgende Rückwirkungen ableiten.

Die Sicherung der Verbindung erfolgt durch die Wirkung einer Kraft senkrecht zu den in Kontakt stehenden Wirkflächen.

Die Sicherung erfolgt durch direkte Kraftwirkung, die dafür benötigte Kraft kann vergleichsweise gering sein.

Die Lagedefinition in durch formschlüssige Verbindungsbestandteile gesicherten Freiheiten erfolgt eindeutig über mechanische Wirkflächen und kann sich an die Wirkung von Störgrößen anpassen. Notwendige Relativbewegungen heben den eindeutig bestimmten Zustand nicht auf und sind deshalb in hohem Maß reproduzierbar.

Die zur Sicherung notwendige Normalkraft muss auf die zu verbindenden Bauteile übertragen werden, dabei entstehende zusätzliche Unfreiheiten sind bei der Betrachtung der Zwangsfreiheit zu beachten und ggf. durch konstruktive Maßnahmen in ihrer Auswirkung zu begrenzen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass formschlüssige Verbindungsbestandteile aufgrund der kleinen wirkenden Normalkräfte und der eindeutigen Lagezuordnung in den durch sie gesicherten Freiheiten für die Anwendung zum unmittelbaren Fassen in OHS geeignet sind.

Sowohl kraft- als auch formschlüssige Verbindungsbestandteile setzen die Wirkung einer Normalkraft voraus. Deshalb ist die Betrachtung von Möglichkeiten zur Erzeugung dieser Kraft notwendiger Bestandteil der Untersuchung zum Lösungsraum. Eine Übersicht von Lösungen für die Funktion „Kraft erzeugen“ ist in der VDI-Richtlinie 2222 gegeben. Auf dieser Basis wurde in [Mooz07] eine Untersuchung und Bewertung von Möglichkeiten zur Erzeugung von Kräften durchgeführt. In deren Ergebnis zeigt sich, dass für die Anwendung zum unmittelbaren Fassen in OHS aufgrund der bestehenden Rahmenbedingungen hinsichtlich des Bauraums, des Anschlusses von Betriebsmedien und der Kontamination im Wesentlichen Federkräfte infrage kommen. Als Federkräfte werden in diesem Zusammenhang Kräfte bezeichnet, deren Erzeugung auf Basis des Hookschen Gesetzes erfolgt, das heißt auf Basis der elastischen Verformung von festen Körpern. Derartig arbeitende Funktionselemente sind in der Technik allgemein als Federn bekannt und haben die Eigen-

schaft, auf Kraftwirkung mit reversibler Verformung zu reagieren und auf diese Weise potenzielle Energie zu speichern.

Kraft- und formschlüssige Verbindungsbestandteile können auf Basis DUV-beständiger Werkstoffe realisiert werden.

Stoffschlüssige Verbindungsbestandteile

Grundsätzliche Eigenschaften stoffschlüssiger Verbindungsbestandteile sind in Abschnitt 4.4 dargestellt. Die Materialien der Fügepartner beim unmittelbaren Fassen optischer Bauelemente schränken jedoch die Auswahl geeigneter Fügeverfahren auf die Verfahren Kleben und Löten sowie das Diffusionsschweißen ein. Verbindungsbestandteile auf Basis dieser Verfahren sollen im Folgenden diskutiert werden.

Das Kleben ist im Bereich der unmittelbaren Fassungstechnik das hauptsächlich angewandte Verfahren zur Herstellung stoffschlüssiger Verbindungen. Es hat sich vor allem wegen seiner geringen Anlagenkosten und der hohen Flexibilität durchgesetzt. Grundlagen, Einteilung und Verfahrensmerkmale von Klebeverbindungen sind in [Habe09] ausführlich dargestellt. Bestehende klebetechnische Lösungen sind jedoch unter verschiedenen Gesichtspunkten hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit zum Fassen optischer Bauelemente in OHS limitiert (vgl. Abschnitt 6.3). Durch die verwendeten organischen Klebstoffe weisen diese Einschränkungen hinsichtlich Feuchtestabilität, UV-Beständigkeit und Beständigkeit bei Temperatur Wechselbeanspruchung und Langzeitstabilität auf [Bans05]. Hinzu kommen Eigenspannungen im Klebstoff, verursacht durch Umwandlungsvorgänge beim Aushärten und unter Einfluss von Umweltbedingungen, welche die Eignung für das spannungsarme Fassen von Hochleistungsoptik einschränken. In verschiedenen Forschungsvorhaben wurde und wird versucht, die Einsatzmöglichkeiten geklebter Verbindungen hinsichtlich der oben gegebenen Restriktionen zu erweitern [Stre04], [Haut06]. In [Stre04] werden wesentliche Einflussfaktoren auf die Spannungsarmut von Klebeverbindungen identifiziert. Gleichzeitig wird dargestellt, dass derzeit keine analytischen Zusammenhänge bekannt sind, mit deren Hilfe diese Einflussfaktoren hinsichtlich geforderter Eigenschaften ausgelegt werden können. Auch konnte gezeigt werden, dass die Eigenspannung infolge von Umwandlungsvorgängen

durch Kleber niedriger Elastizität und ein geeignetes Zeit-Temperatur-Regime bei Herstellung der Klebeverbindung positiv beeinflusst werden kann. Zudem wurde nachgewiesen, dass Klebeverbindungen mit geringen Eigenspannungen eine erhöhte Lagestabilität zeigen, da Zustände geringer Eigenspannung einem thermodynamischen Gleichgewicht in der Klebeverbindung nahekommen. Ein thermodynamisches Ungleichgewicht tritt deshalb als Antrieb für Umwandlungsvorgänge nur noch begrenzt in Erscheinung.

Allgemein lassen sich für die Anwendung von Klebeverbindungen zum unmittelbaren Fassen in OHS zwei wesentliche Problemfelder identifizieren:

- Mechanische Spannungen beim Aushärten des Klebers und
- Empfindlichkeit des Klebstoffs gegenüber Störgrößen im Rahmen der Systemanwendung.

Aufgrund dieser Einschränkungen sind Klebeverbindungen für den Aufbau von optischen Hochleistungssystemen nur bedingt geeignet. Unabhängig von den Eigenschaften der verwendeten Kleber und den Ergebnissen zukünftiger Kleberentwicklungen kann jedoch das Verhalten von Klebeverbindungen beim Einsatz in optischen Systemen durch gezielte Maßnahmen positiv beeinflusst werden.

Der grundsätzliche Wirkzusammenhang in **Klebeverbindungen** und wesentliche Einflussfaktoren sind in Abbildung 6-7 dargestellt. Umwandlungsvorgänge im Klebstoff führen zu Volumenänderungen, Volumenänderungen führen zur Änderung des Kräftegleichgewichts und zu mechanischen Spannungen, Veränderungen des Kräftegleichgewichts haben Einfluss auf die Relativlage der zu verbindenden Bauelemente.

Zunächst soll das Problemfeld der **mechanischen Spannungen im Rahmen der Aushärtung** des Klebers betrachtet werden. Beim Aushärten kommt es zu Umwandlungsvorgängen im Klebstoff. Der Ablauf dieser Umwandlungsvorgänge und das sich einstellende thermodynamische Gleichgewicht, welches gleichzeitig ein Kräftegleichgewicht zur Folge hat, können durch die Zusammensetzung des Klebers und die Prozessführung beim Aushärten beeinflusst werden. Infolge der Umwandlungsvorgänge kommt es zu einer Volumenänderung (Schrumpfung) des Klebstoffes, diese findet immer statt. Das

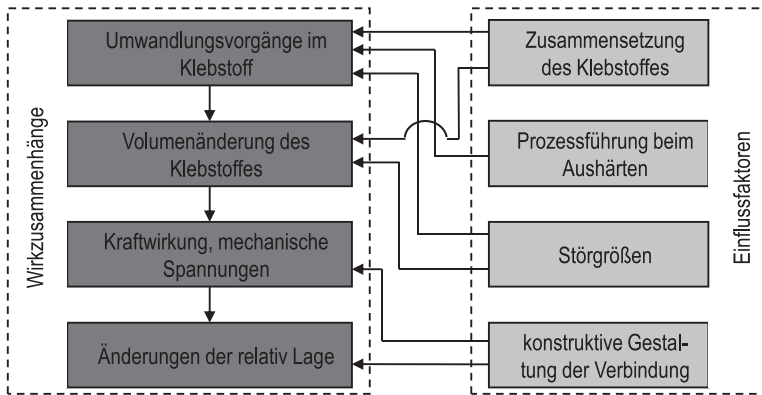


Abbildung 6-7 Wirkschema und Einflussfaktoren in Klebeverbindungen

Ausmaß dieser Schrumpfung ist wiederum von der Zusammensetzung des Klebstoffes abhängig (vgl. Kapitel 4.4). Die Schrumpfung allein führt noch nicht zu mechanischen Spannungen im optischen Bauelement. Erst wenn diese Schrumpfung behindert wird, kommt es zu einer Kraftwirkung und damit zu mechanischen Spannungen. Beim Fassen optischer Bauelemente finden nach dem Stand der Technik Ring- oder Umfangsklebungen entsprechend Abbildung 6-3 Anwendung. Beim Schrumpfen kann das optische Bauelement nicht durch eine Anpassbewegung folgen, die Verbindung verspannt sich in sich selbst und es kommt zu einer Kraftwirkung mit daraus resultierenden mechanischen Spannungen. Die Größe der entstehenden Kräfte ist vom konstruktiven Aufbau der Klebeverbindung und von den Eigenschaften des Klebstoffes abhängig. In der Klebetechnik ist die besonders ausgeprägte Entstehung von mechanischen Spannungen in runden Klebeverbindungen bekannt [Habe07], findet jedoch beim Fassen optischer Bauelemente bisher keine Beachtung. Die beschriebenen Kraftwirkungen bzw. mechanischen Spannungen, speziell beim Fassen optischer Bauelemente durch Kleben, sind somit das Ergebnis der spezifischen Eigenschaften des Klebstoffes in Kombination mit dem konstruktiven Aufbau der Verbindung.

Möglichkeiten zur Verbesserung des Spannungszustandes in Klebeverbindungen ergeben sich durch Begrenzung der durch Schrumpfung des Klebers erzeugten Kräfte. Hierzu ist beispielsweise eine geeignete Prozessführung mit dem aufeinander folgenden Aushärten diskreter Klebepunkte denkbar. In diesem Fall bewegt sich das optische Bauelement bei jeder Schrumpfung in den spezifischen spannungsärmsten Zustand, auf welchem dann der nächste Klebepunkt aufbaut. Eine andere Möglichkeit der Verbesserung stellt die axiale Anordnung der Klebepunkte dar. Die bei Schrumpfung des Klebers auftretenden Kräfte werden in diesem Fall direkt in der Klebung kurzgeschlossen, eine Verspannung über das optische Bauelement kann nicht erfolgen.

Als Nächstes erfolgt die Betrachtung des Problemfeldes 2: **Empfindlichkeit des Klebstoffes gegenüber Störgrößen im Rahmen des Einsatzes optischer Systeme**. Das Wirkschema für den Einfluss von Störgrößen auf Klebeverbindungen zum unmittelbaren Fassen optischer Bauelemente ist in Abbildung 6-8 gegeben.

Die Störgröße Temperaturänderung bewirkt bei allen Konstruktionselementen eine Volumenänderung. Die Störgrößen Feuchtigkeit und Strahlung wirken im Wesentlichen auf das Konstruktionselement Klebstoff, hier können

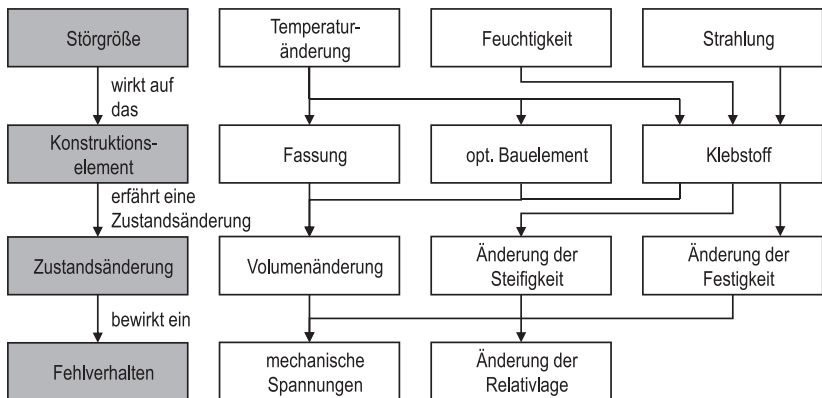


Abbildung 6-8 Wirkschema für den Einfluss von Störgrößen auf Klebeverbindungen beim Fassen optischer Bauelemente

diese sowohl Umwandlungsvorgänge im Klebstoff und daraus resultierend Volumenänderungen als auch direkt Volumenänderungen hervorrufen (vgl. auch Abbildung 6-7). Neben einer Volumenänderung erfährt der Kleber unter Einfluss der gegebenen Störgrößen eine Änderung seiner Steifigkeit und Festigkeit. Die dargestellten Zustandsänderungen wiederum wirken sich in Form mechanischer Spannungen und einer Änderung der Relativlage auf die Verbindung optisches Bauelement zu Fassung aus. Im Rahmen der Entwicklung des optischen Systems kann zum einen die Einwirkung von Störgrößen limitiert und zum anderen das resultierende Fehlverhalten durch geeignete konstruktive Maßnahmen positiv beeinflusst werden. Zur Limitierung des Störgrößeneinflusses sind aufwendige Klimatisierungen und Schwingungsdämpfung Stand der Technik [SMS06]. Ein Schutz des Klebers vor Strahlung erfolgt durch Blenden und Kleberschutzschichten [BKKEW99]. In OHS ist es zusätzlich notwendig, das Fehlverhalten konstruktiv zu begrenzen. Um mechanische Spannungen infolge von Volumenänderungen von Fassung, optischem Bauelement und Klebstoff klein zu halten, werden in der Regel Klebstoffe mit geringer Steifigkeit (hoher Elastizität) eingesetzt. Diese sind, wie bereits dargestellt, besonders empfindlich für die gegebenen Störgrößen. Eine Möglichkeit, die Volumenänderungen zwischen Fassung und optischem Bauelement infolge von Temperaturgang zu kompensieren, bieten Kompensationsfassungen; eine Darstellung der Funktionsweise erfolgt im Anschluss.

Neben dem Kleben sind Verfahren der Verfahrenshauptgruppe Löten für das unmittelbare Fassen optischer Bauelemente geeignet. **Löten** ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von festen Werkstoffen mithilfe eines Zusatzwerkstoffes (Lot) und von Hilfsstoffen [VDI2251-3]. Beim Löten entsteht durch Schmelzen des Lotes oder durch Diffusion eine flüssige Phase, hierbei wird die Solidustemperatur der Grundwerkstoffe nicht erreicht. Die verschiedenen Lötverfahren lassen sich nach unterschiedlichen Gesichtspunkten klassifizieren. Hinsichtlich des Arbeitstemperaturbereiches finden zum Aufbau optischer Systeme Weichlötverfahren mit Löttemperaturen bis 450 °C Anwendung. Durch die Eigenschaften von Lötverbindungen wie Temperaturbeständigkeit, Beständigkeit gegen Feuchtigkeit und Bestrahlung können die Anwendungsbereiche optischer Systeme deutlich erweitert werden [Bans05].

Die zum Schmelzen des Lotes erforderliche Energie in Form von Wärme stellt das wesentliche Problem bei der Anwendung von Lötverfahren zum unmittelbaren Fassen in OHS dar und schränkt das Spektrum der anwendbaren Verfahren stark ein. Im Bereich der Optikmontage werden vorwiegend das Ofenlöten und das Laserstrahllöten genutzt [Blie08]. Zur Minimierung von thermisch induzierten Spannungen im optischen Bauelement und in der Fügeverbindung finden unterschiedliche Vorgehensweisen Anwendung. Zum einen sind dies Verfahren mit gemeinsamer Temperaturführung. Hier werden die Fügepartner gemeinsam einem definierten Zeit-Temperatur-Regime unterworfen, mit dem Ziel, durch gleichmäßige Erwärmung und Abkühlung Temperaturgradienten und schädliche lokale Spannungsspitzen zu vermeiden. Allerdings müssen bei diesen Verfahren besondere Vorkehrungen zur Kompensation unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten des optischen Bauelements und der Fassung getroffen werden. Verfahren mit gemeinsamer Temperaturführung finden vorwiegend in Form von Ofenlötungen unter Vakuum oder Schutzgasatmosphäre statt. Exemplarisch sei hier auf [HDD98] verwiesen. Ein üblicher Schichtaufbau aus Haftschicht, Diffusionssperrschicht, Oxidationsschutzschicht und Lot ist ebenfalls in [HDD98] dargestellt. Die Schichten werden mittels Dünnschichtbeschichtungsverfahren, beispielsweise Sputterverfahren, aufgebracht. Eine weitere Möglichkeit, thermisch induzierte Störungen zu vermeiden, ist die lokale Begrenzung des Energieeintrags. Hierzu finden in der Mikrooptik Verfahren des Laserstrahl löten Anwendung [Bans05], [BEBS05]. Neuere Veröffentlichungen kombinieren das Laserstrahl löten mit dem aus der Mikroelektronik bekannten Verfahren des Solder Bumping [BBAO07]. Dadurch wird auch für komplexe und schwer zugängliche Geometrien ein flexibles Verbindungsverfahren zur Verfügung gestellt. Eine andere Möglichkeit zur Erzeugung einer lokal begrenzten und kontrollierten Erwärmung auf Basis des Widerstandslöten wird in [TaHo08] dargelegt. Ein Verfahren zum Einsatz bei der Verbindung von Komponenten, bei denen eine Erwärmung vermieden werden muss, beispielsweise bei Sensoren auf Basis von biologischen Materialien (Biosensoren), ist in [MBOR05] dargestellt. Dieses auf der Verwendung reaktiver Materialien basierende Verfahren nutzt eine exotherme Reaktion der reaktiven Materialien zur Aufschmelzung des Lotes.

Die von außen induzierte Reaktion bleibt dabei auf die reaktiven Materialien beschränkt und führt damit zu einer hinsichtlich der Energie und der lokalen Ausdehnung eng begrenzten Belastung der beteiligten Fügepartner.

Wie dargestellt existieren für die Erzeugung von Lötverbindungen verschiedene Verfahren, welche für das unmittelbare Fassen optischer Bauelemente grundsätzlich geeignet sind. Die Vorteile von Lötverbindungen gegenüber Klebeverbindungen resultieren aus der Verwendung von metallischen Fügehilfsstoffen (Loten), diese sind gegenüber den Störgrößen Strahlung und Feuchtigkeit unempfindlich. Die im Vergleich zu Klebeverbindungen höhere Steifigkeit der Lote in Kombination mit geringen Lötstichtdicken führt zu einer gegenüber geklebten Verbindungen deutlich geringeren Elastizität. In Klebeverbindungen kommt dem Klebstoff neben der Sicherung auch die Aufgabe zu, durch sein elastisches Verhalten das optische Bauelement zumindest teilweise von mechanischen Spannungen zu entkoppeln. In Lötverbindungen sind hierzu spezielle konstruktive Maßnahmen notwendig. Auf diese wird im nachfolgenden Abschnitt eingegangen.

Neben Kleben und Löten findet für das Fügen von optischen Bauelementen das **Diffusionsschweißen** Anwendung. Das Diffusionsschweißen ist ein Prozess für die Erzeugung stoffschlüssiger Verbindungen von gleichen und/oder unterschiedlichen Werkstoffen durch Diffusionsvorgänge zwischen den Verbindungspartnern. Die Qualität der erreichbaren Schweißverbindungen ist sehr hoch, und es werden Festigkeiten erzielt, die im Bereich der Grundfestigkeit der zu verschweißenden Fügepartner liegen [Blie08]. Zur Einleitung der Diffusionsvorgänge müssen die Atome der Verbindungspartner in den Bereich ihrer Atomabstände angenähert und die für die Platzwechsel der Atome notwendige Energie muss in Form von Wärme zugeführt werden. Dementsprechend setzt das Verfahren eine sehr gute Vorbereitung der Kontaktflächen, eine Annäherung der Oberflächengeometrien durch Druck und Verformung und die Aktivierung durch Wärmezufuhr voraus. Beim Diffusionsschweißen unter Beteiligung glasiger Werkstoffe findet der Diffusionsschweißprozess bei 50 bis 60 % der Schmelztemperatur statt [Blie08]. Hierbei spielt die Formstabilität des Glases durch beginnende Erweichung eine wichtige Rolle, wobei eine plastische Verformung im Mikrobereich stattfindet, welche sich günstig

auf die Verbindungsbildung auswirken kann [IFW10]. Anwendungen des Diffusionsschweißens im Bereich der optischen Technologien finden sich, wo andere Fügeverfahren nicht eingesetzt werden können, insbesondere wenn die Fügeflächen der zu verbindenden Bauteile eine optische Funktion haben und diese nicht durch Zusatzwerkstoffe wie Kleber oder Lote beeinträchtigt werden darf. Dokumentierte Anwendungen sind das flächige Verbinden optischer Bauelemente aus gleichen Grundwerkstoffen, wobei die Verbindung an den optischen Wirkflächen erfolgt. Ebenfalls bekannt ist die Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe wie Gläser mit Glaskeramiken oder von Quarz mit Borosilikatgläsern. Alle dokumentierten Anwendungen sind durch die Verwendung von Werkstoffen mit gleichem oder ähnlichem Wärmeausdehnungskoeffizienten gekennzeichnet. Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass das Diffusionsschweißen ein Verfahren ist, welches unter Anwendung von Druck und Wärmeenergie sowie mit elastischer und plastischer Verformung der Fügepartner arbeitet. Für die Verbindung von optischen Bauelementen mit metallischen Fassungen liegen keine dokumentierten Ergebnisse vor; hier lassen die hohen Unterschiede der Wärmeausdehnungskoeffizienten in Kombination mit relativ hohen Prozesstemperaturen erhebliche mechanische Spannungen erwarten. Für die Anwendbarkeit des Diffusionsschweißens zur Erzeugung spannungsarmer Verbindungen entsprechend OHS-typischer Anforderungen bestehen deshalb derzeit keine Anhaltspunkte.

Allgemein lässt sich feststellen, dass stoffschlüssige Verbindungsbestandteile hinsichtlich der Kriterien Spannungsarmut und Lagestabilität nur in Kombination mit zusätzlichen konstruktiven Maßnahmen zum unmittelbaren Fassen in OHS geeignet sind. Klebeverbindungen sind durch die Empfindlichkeit aktueller Klebstoffe gegen die auftretenden Störgrößen, besonders DUV-Strahlung, in ihrer Anwendbarkeit limitiert. Lötverbindungen sind unempfindlich gegen die Störgrößen Feuchtigkeit und Strahlung. [Bans05] verzeichnet beim Laserstrahl-löten von Mikrooptik eine Änderung des Passfehlers $< 32 \text{ nm}$ und stößt damit in die Größenordnung der gegebenen Anforderungen für OHS vor. Allerdings ist anzumerken, dass Änderungen des Passfehlers sehr stark von der Geometrie des optischen Bauelementes abhängig sind. Hier ist zu erwarten, dass Bauelemente der Mikrooptik durch ihre kompakte Geometrie weniger empfindlich

reagieren als OHS-typische, optische Bauelemente. Aktuell sind dem Autor keine Veröffentlichungen bekannt, die das Potenzial von Lötverbindungen für den Einsatz in OHS in der praktischen Umsetzung belegen würden.

6.4.4 Anwendung feinwerktechnischer Konstruktionsprinzipien

In den vorangegangenen Abschnitten sind bei der Analyse verschiedener unmittelbarer Fassungstechniken, bei der Betrachtung mechanischer Verbindungen und bei der Erarbeitung des Lösungsraumes Problemfelder sichtbar geworden, welche sich wiederholen und deren gezielte Beeinflussung durch die Konstruktionsprinzipien der Gerätetechnik nach Schilling hier vorgestellt werden soll. Diese Konstruktionsprinzipien sind allgemein zugänglich und umfassend in [Schil82], in Abwandlung in [Krau00] oder in [TUI03] veröffentlicht, deshalb wird in diesem Rahmen auf eine Wiederholung sämtlicher Prinzipien verzichtet.

Die Problemfelder lassen sich unter verschiedenen Gesichtspunkten ordnen und bewerten. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Darstellung gewählt, welche in Form einer Übersicht den Sachverhalt und anwendbare Konstruktionsprinzipien darstellt. Diese Vorgehensweise erlaubt es, übergeordnete Gemeinsamkeiten aufzufinden und entsprechende Lösungen allgemein vorzustellen. Die spezifischen Sachverhalte und ihre Wirkmechanismen wurden in den betreffenden Kapiteln bereits dargestellt und können dort nachgelesen werden. Die beschriebene Übersicht ist in Tabelle 6-5 gegeben und erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll wesentliche Punkte abdecken und ein Bewusstsein für die Gestaltungsmöglichkeiten im Rahmen der konstruktiven Umsetzung schaffen.

In der Zusammenstellung in Tabelle 6-5 werden zwei wiederkehrende Problemstellungen sichtbar: der Umgang mit Kräften (Spannungsarmut) und der Umgang mit Relativbewegungen (Lagestabilität).

Die aufgeführten Konstruktionsprinzipien können bei der Beherrschung dieser Problemfelder zweckmäßig eingesetzt werden. Dieser Einsatz soll im Folgenden an konkreten Beispielen dargestellt werden.

Tabelle 6-5 Problemfelder beim unmittelbaren Fassen optischer Bauelemente in OHS

	Sachverhalt	Konstruktionsprinzip
Umgang mit Kräften	<ul style="list-style-type: none"> Wirkung von Normalkräften in kraft- und formschlüssigen Verbindungsbestandteilen (siehe Kap. 4.4, 6.4.3)	<ul style="list-style-type: none"> kurze und direkte Kraftleitung
	<ul style="list-style-type: none"> Schrumpfung von Fügehilfsstoffen <ul style="list-style-type: none"> im Rahmen der Herstellung unter Einfluss von Störgrößen (siehe Kap. 4.4, 6.3, 6.4.3)	<ul style="list-style-type: none"> kurze und direkte Kraftleitung Fehlerminimierung Fehlerkompensation
	<ul style="list-style-type: none"> unterschiedliche thermische Dehnung von optischem Bauelement, Fassung und weiteren Verbindungselementen <ul style="list-style-type: none"> im Rahmen der Herstellung unter Einfluss von Störgrößen (siehe Kap. 6.2, 6.3, 6.4.3)	<ul style="list-style-type: none"> kurze und direkte Kraftleitung Fehlerminimierung Fehlerkompensation Vermeidung von Überbestimmtheiten
Umgang mit Relativbewegungen	<ul style="list-style-type: none"> unterschiedliche thermische Dehnung von optischem Bauelement, Fassung und weiteren Verbindungselementen <ul style="list-style-type: none"> im Rahmen der Herstellung unter Einfluss von Störgrößen (siehe Kap. 6.2, 6.3, 6.4.3)	<ul style="list-style-type: none"> Fehlerminimierung Fehlerkompensation
	<ul style="list-style-type: none"> reibungsbehaftete Relativbewegungen in den mechanischen Wirkflächen (siehe Kap. 4.4, 6.4.3)	<ul style="list-style-type: none"> Fehlerminimierung

Das Prinzip der **kurzen und direkten Kraftleitung** gehört zur Gruppe der Prinzipien des Kraftflusses. Diesen liegt die Vorstellung eines Kraftfeldes zugrunde, welches immer in sich geschlossen ist, also nicht an unbestimmter Stelle im technischen Gebilde beginnt oder aufhört. Es besagt, dass der kürzeste und direkteste Weg für das Weiterleiten von Kräften mit den geringsten Verformungen verknüpft ist [Schill82]. Hinsichtlich der Wirkung kann zwischen

dem Weiterleiten von Druck- und Zugkräften unterschieden werden. Eine Anwendung des Prinzips zur Weiterleitung von Druckkräften findet sich in der Aufnahme von Normalkräften in kraft- und formschlüssigen Verbindungsbestandteilen und ist in Abbildung 6-9 dargestellt. In Abbildung 6-9 a) erfolgt die Verbindung zwischen optischem Bauelement und Fassung durch radiales Klemmen, hierzu greift eine Vielzahl federnd ausgeführter Klemmelemente auf dem gesamten Umfang in eine am Außenzylinder des optischen Bauelementes angebrachte Nut ein. Grundsätzlich erfolgt die Sicherung der Verbindung über kraft- und formschlüssige Verbindungsbestandteile.

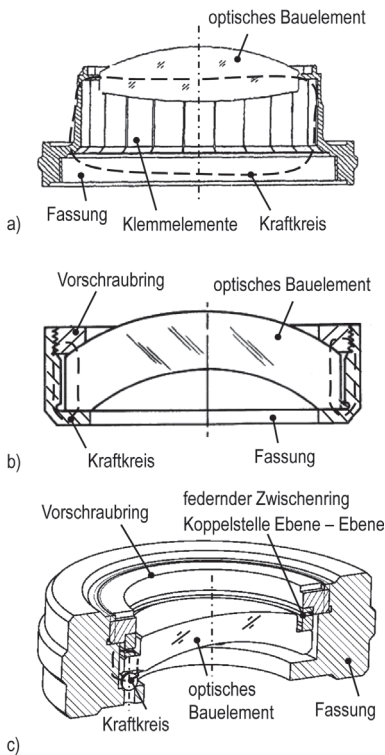


Abbildung 6-9 Weiterleitung von Normalkräften a) Elastischer Linsenträger [Schle01] b) Fassung mittels Vorschraubring [Yod08] c) Fassung durch Klemmen

Der Kraftkreis für die Aufnahme bzw. Weiterleitung der notwendigen Normalkräfte wird auf langem Weg durch das optische Bauelement geschlossen. Das Fassen mittels Vorschraubring nach Abbildung 6-9 b) wurde bereits in Abschnitt 6.2 analysiert, der Kraftschluss zur Weiterleitung der Normalkräfte erfolgt in dieser Anordnung axial und nur durch den Randbereich der optischen Wirkflächen. Eine weitere Möglichkeit zur Gestaltung des Kraftflusses ist in Abbildung 6-9 c) gegeben; hier wird der für die optische Funktion nicht genutzte Bereich des optischen Bauelementes zusätzlich bearbeitet, um den

Kraftweg im optischen Bauelement weiter zu verkürzen. Die Darstellungen in Abbildung 6-9 soll nur das Prinzip verdeutlichen. Die Einsatzfähigkeit bestimmter Lösungen hängt vom Zusammenwirken sämtlicher Funktionselemente der Verbindung ab.

Die Anwendung des Prinzips der kurzen und direkten Kraftleitung zur Beherrschung von Zugkräften spielt bei Betrachtung der Kleberschrumpfung in formschlüssigen Verbindungsbestandteilen eine Rolle. Eine Darstellung hierzu findet sich in Abbildung 6-10. Bild a) zeigt den Kraftfluss bei einer Ringklebung nach dem Stand der Technik. Die Volumenänderung des Klebstoffes in Form von Schrumpfung führt zu Zugkräften. Der Kraftkreis für die Aufnahme dieser Zugkräfte wird auf langem Weg durch das optische Bauelement geschlossen und führt zu einer Verspannung der Klebung in sich selbst. Abbildung 6-10 b) zeigt die Anordnung der Klebeverbindung axial zum optischen Bauelement. Weiterhin wird nur auf drei Segmenten aufgelegt und geklebt, sodass für die axialen Koppelstellen durch definiert kleine Flächenberührung kein zusätzlicher Zwang aufgrund von Gestaltfehlern der mechanischen Wirkflächen entsteht.

Der Kraftkreis für die Zugkräfte durch Schrumpfen des Klebers wird auf kurzem Weg axial geschlossen; betrachtet man nur das Schrumpfen des Klebers, verspannt sich die Klebeverbindung hierbei nicht mehr in sich selbst. Unter Einfluss von radial wirkenden Kräften infolge Temperatureingang kommt es weiterhin zu einem Kraftschluss radial durch das optische Bauelement. In Abbildung 6-10 c)

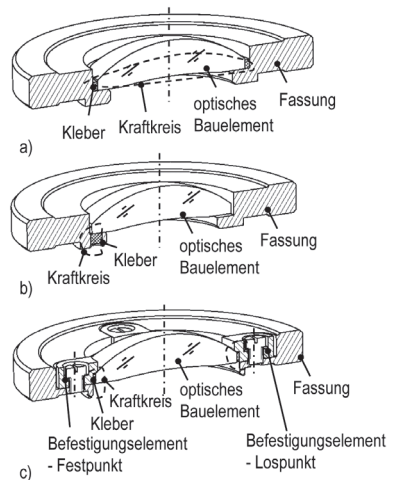


Abbildung 6-10 Weiterleitung von Zugkräften durch Kleberschrumpfung a) Ringklebung b) Klebung axial auf Ringschneide c) Klebung mit Festpunkt-Lospunkt-Anordnung

erfolgt die Anordnung der Klebeverbindung radial. Hierzu ist das optische Bauelement mit vier Befestigungselementen verklebt. Der Kraftkreis wird aber durch die Abwandlung des Prinzips Festlager – Loslager radial kurzgeschlossen. Hierzu sind die vier Befestigungselemente radial auf 360° verteilt angeordnet. Zwei im Winkel von 90° zueinander angeordnete Befestigungselemente bilden die Festpunkte und sind unbeweglich mit der Fassung verbunden. Die jeweils den Festpunkten gegenüberliegenden Befestigungselemente bilden die Lospunkte, diese sind mithilfe eines federnden Rings axial nur mit kleiner Kraft vorgespannt und können sich dadurch radial bewegen. Diese Anpassbewegung verhindert eine radiale Verspannung der Punkte gegeneinander und kann somit Kraftwirkungen auf das optische Bauelement vermeiden. Nachteil der Anordnung nach Abbildung c) ist ihr bezüglich der optischen Achse unsymmetrisches Funktionsprinzip. Dieses führt bei Anpassbewegungen zu einer Dezentrierung des optischen Bauelementes.

Das Prinzip des **Vermeidens von Überbestimmtheiten** hat das Ziel, Verbindungen zwangfrei bzw. zwangarm zu gestalten. Nur beim Vermeiden jeglicher Überbestimmtheit wird der Grundregel der Eindeutigkeit entsprochen und die Möglichkeit gegenseitiger schädlicher Einflussnahme zwischen den Elementen beseitigt [Schill82]. Zur Vermeidung oder Beherrschung von Überbestimmtheiten gibt Schilling folgende Maßnahmen an:

- Beseitigung von Überbestimmtheiten über konstruktive Maßnahmen durch Änderung des technischen Prinzips und Änderung der Gestaltung einzelner Koppelstellen sowie
- Zulassung von Überbestimmtheiten und Verringerung ihrer Auswirkungen (Zwangarmut) durch entsprechend enge Fertigungstoleranzen, Herstellung identischer Istmaße durch geeignete Bearbeitung, Justierung und elastische Bauweise.

Die Anwendung dieser Maßnahmen soll exemplarisch an der Fassung einer Linse nach Abbildung 6-11 dargestellt werden. Abbildung 6-11 a) zeigt eine Fassung mit eingelegtem optischen Bauelement, die Lagedefinition zwischen

Linse und Fassung ist eindeutig durch die dreifache Anordnung der Koppelstelle Kugel – V-Nut gegeben.

Hierbei ist die Kugel fest mit der Fassung verbunden und die V-Nut direkt in das optische Bauelement eingebracht. Zur Sicherung des Zustandes nach Abbildung a) ist mittels geeigneter Maßnahmen der Kontakt in den Koppelstellen aufrechtzuerhalten. Die hierfür notwendige Normalkraft wird über federnde Elemente erzeugt und über mechanische Koppelstellen übertragen. Diese zusätzlichen Koppelstellen zur Weiterleitung der Normalkraft sind zwangarm oder zwangsfrei auszuführen. In Abbildung 6-11 b) wird die Vorspannkraft durch einen federnden Ring aufgebracht, dieser wird über einen Vorspannring vorgespannt und in diesem gehalten. Diese Anordnung ist zwangarm, da die zur Sicherung notwendige Koppelstelle Ebene – Ebene weder Translationen in Richtung x und y noch eine Rotation um z definiert. Die Bestimmung der Freiheiten Rotation um x und y und die Translation entlang z wird durch die Elastizität des Ringes ausgeglichen. Eine Möglichkeit zur zwangsfreien Anordnung durch Änderung des technischen Prinzips ist in Abbildung 6-11 c) dargestellt.

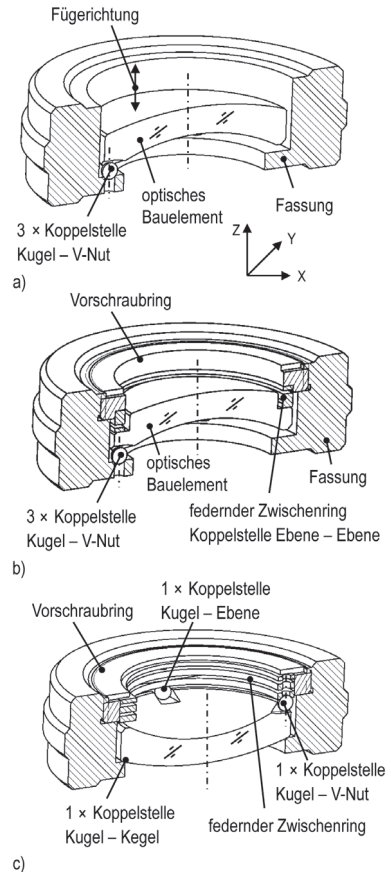


Abbildung 6-11 Sicherung der Fügerichtung a) ohne Sicherung b) Sicherung zwangarm c) Sicherung zwangsfrei

Die Verbindung wird durch die Koppelstellen Kugel – Kegel, Kugel – V-Nut und Kugel – Ebene gebildet, wobei die Anordnung der Koppelstellen so gewählt ist, dass die Normalkräfte zur Sicherung der Verbindung direkt durch die lagedefinierenden Koppelstellen aufgebracht werden. Die Koppelstelle Kugel – Kegel definiert alle drei Translationen. Die Koppelstellen Kugel – V-Nut und Kugel – Ebene werden über einen federnden Zwischenring mit fest verbundenen Kugeln und entsprechenden Gegenflächen in der Linse gebildet. Diese Koppelstellen definieren durch ihre Anordnung drei Rotationen. Der federnde Ring wird mithilfe eines Vorschraubringes vorgespannt und erzeugt auf diese Weise die zur Sicherung notwendige Normalkraft.

Eine Eigenschaft zwangarmer oder zwangfreier Anordnungen ist, dass sie sich unter Einfluss von Störgrößen anpassen können, jedoch sind die dazu stattfindenden Relativbewegungen in den Fügeflächen gleitreibungsbehaftet. Das heißt, dass diese trotz Eindeutigkeit durch mikroskopische Effekte nicht vollständig reproduzierbar sind. Deshalb soll im Folgenden der Umgang mit Relativbewegungen betrachtet werden. Eine wesentliche Ursache für Relativbewegungen zwischen den beteiligten Bauelementen einer Verbindung ist Temperaturgang im Zusammenspiel mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Die im Folgenden exemplarisch an einer konkreten Lösung vorgestellte Anwendung des Konstruktionsprinzips Fehlerminimierung eignet sich sowohl für das Problemfeld des Umgangs mit Kräften als auch für das Problemfeld des Umgangs mit Bewegungen. Die hierzu notwendigen Betrachtungen werden an einer Verbindung zwischen optischem Bauelement und Fassung vorgestellt, welche durch Kleben gesichert ist und deshalb grundsätzlich die Nachteile dieses Verbindungsbestandteils aufweist (vgl. Kapitel 6.4.3).

Das als **Prinzip der Fehlerminimierung** bezeichnete Konstruktionsprinzip hat das Ziel, die schädlichen Auswirkungen von Fehlverhalten auf funktionswichtige Größen zu begrenzen. Im Falle einer geklebten Verbindung besteht das Fehlverhalten in einer Volumenänderung des Klebers unter Störgrößeneinfluss, welches, wie bereits in Kapitel 6.3 dargestellt, zu einer Kraftwirkung auf das optische Bauelement und zu Relativbewegungen zwischen optischem Bauelement und Fassung führen kann. Eine Möglichkeit, diese Einflüsse durch konstruktive Maßnahmen zu minimieren, ist durch die Anwendung eines fe-

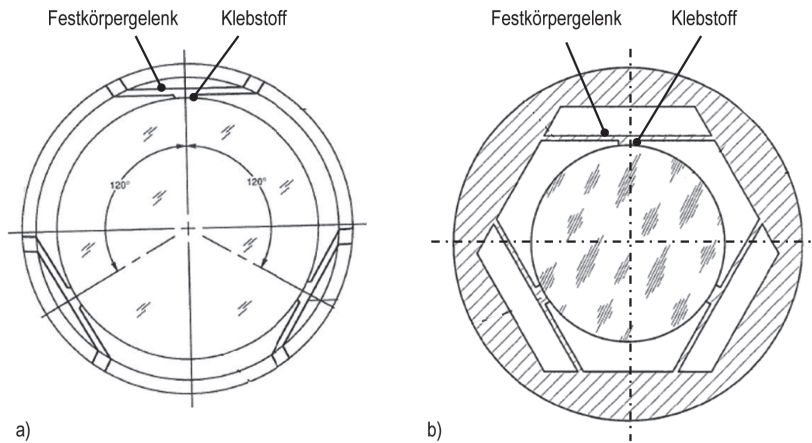


Abbildung 6-12 Fassung in elastischer Bauweise: a) Ausführung nach [Dudz93]
b) Ausführung nach [Hage09]

dernden Aufbaus entsprechend Abbildung 6-12 gegeben. Dieser beispielsweise in [Yod08] und [Vuko93] vorgestellte Ansatz wurde ursprünglich für die Anwendung in Systemen mit sehr weitem Temperatureinsatzbereich entwickelt. In diesem Rahmen wird durch federnde Elemente die Kraftwirkung auf das optische Bauelement minimiert. Das zugrunde liegende Wirkprinzip kann allgemein im Bereich der OHS sinnvoll angewandt werden. Im Aufbau nach Abbildung 6-12 wird dem Kleber ein elastisches Element in Form eines **Festkörpergelenks**⁵ in Reihe geschaltet. Da dieser Ansatz eine hohe praktische Relevanz hat, soll dessen grundsätzliche Funktionsweise an einem vereinfachten, zweidimensionalen Modell nach Abbildung 6-13 im Detail erklärt werden.

Bei geklebten Anordnungen erfolgt beim Aushärten des Klebstoffes durch Schrumpfen des Klebers eine Verspannung der einzelnen Anlagepunkte ge-

5 Festkörpergelenke sind Funktionselemente, die auf Basis elastischer Verformung fester Körper arbeiten. Diese elastische Verformbarkeit ermöglicht es, sie für Führungen und Gelenke einzusetzen. Wesentliche Vorteile sind Spielfreiheit, innere Reibung (Stick-Slip-frei), Wartungs- und Verschleißfreiheit sowie das genau berechenbare Verhalten. Im Gegenzug erlauben sie nur relativ kleine Bewegungen und sind anfällig für Schwingungen.

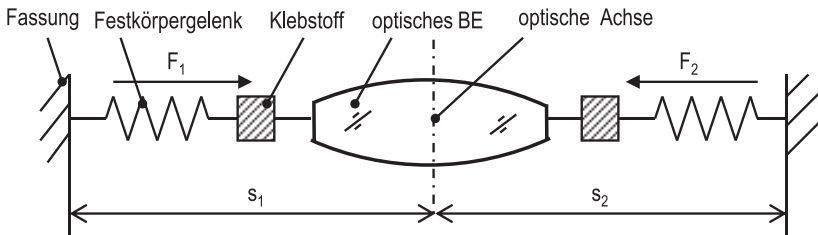


Abbildung 6-13 Funktionsprinzip – Fassung in elastischer Ausführung

geneinander, die dabei auftretenden Kräfte können aber durch Auslegung der Festkörpergelenke entsprechend den gegebenen Anforderungen limitiert werden. Die Auslegung der Steifigkeit der Festkörpergelenke erfolgt dabei zwischen gegenläufigen Anforderungen nach hoher Eigenfrequenz und damit hoher Steifigkeit und hoher Spannungsentkopplung und damit niedriger Steifigkeit.

Die in der Klebeverbindung herrschenden Spannungszustände stellen, wie in Kapitel 6.3 gezeigt, ein Kräftegleichgewicht dar, durch welches die Relativlage zwischen optischem Bauelement und Fassung bestimmt ist. Änderungen des Spannungszustandes führen zu Änderungen des Kräftegleichgewichts und damit der Relativlage, wenn diese nicht homogen, das heißt nicht in der gesamten Klebung gleichmäßig sind. Nach [Stre04] sind die Materialeigenschaften von Klebschichten hochgradig inhomogen, deshalb ist unter Einfluss von Störgrößen eine Änderung des Kräftegleichgewichts in der Klebeverbindung und damit der Relativlage zwangsläufig zu erwarten; dies soll im Folgenden betrachtet werden.

Allgemein kann jedes mechanische System als eine Verknüpfung von massebehafteten Elementen mit endlicher Steifigkeit betrachtet werden. Betrachtet man weiterhin beide Seiten des schematischen Aufbaus nach Abbildung 6-13 als Teilsysteme, die sich in einem Gleichgewichtszustand befinden, lässt sich die Funktionsweise über die Wirkungsweise dieses Kräftegleichgewichts beschreiben. Die Relativlage soll hierbei durch die optische Achse als Symmetrieachse zwischen den Teilsystemen beschrieben werden. Die Position dieser Achse ist durch das Kräftegleichgewicht von F_1 und F_2 entsprechend Gl. 6-1 gegeben.

$$F_1 = F_2 \quad \text{Gl. 6-1}$$

Allgemein lassen sich Kräfte in federnden Anordnungen durch die Federspannkraft F_s nach Gl. 6-2 ausdrücken.

$$F_s = c \cdot s \quad \text{Gl. 6-2}$$

Dabei setzt sich die Federsteifigkeit c aus einer Reihenschaltung der Federsteifigkeiten der Einzelemente nach Gl. 6-7 zusammen und die Länge s ergibt sich aus der Summe der Teillängen bzw. Teilfederwege der Einzelemente. Durch Betrachtung von Gl. 6-2 für die beiden Teilsysteme und das Einsetzen in Gl. 6-1 erhält man für das Kräftegleichgewicht im Ausgangszustand die Gl. 6-3.

$$c_1 \cdot s_1 = c_2 \cdot s_2 \quad \text{Gl. 6-3}$$

Unter Einfluss von Störgrößen kommt es entsprechend Abbildung 6-8 zu einer Änderung von Zustandsgrößen. Die wesentlichen sich ändernden Zustandsgrößen sind die Volumina der beteiligten Konstruktionselemente, im Modell repräsentiert durch die Länge s und die Federsteifigkeit des Klebstoffes, wobei die Volumenänderungen den dominierenden Faktor darstellen. Auch unter Einfluss von Störgrößen kommt es zur Ausbildung eines Kräftegleichgewichts, die Volumenänderung durch Störgrößeneinfluss kann durch eine Längenänderung Δs dargestellt werden; es ergeben sich Gl. 6-4 und Gl. 6-5.

$$c_1 \cdot (s_1 + \Delta s_1) = c_2 \cdot (s_2 + \Delta s_2) \quad \text{Gl. 6-4}$$

$$c_1 \cdot s_1 + c_1 \cdot \Delta s_1 = c_2 \cdot s_2 + c_2 \cdot \Delta s_2 \quad \text{Gl. 6-5}$$

Der jeweils erste Term von Gl. 6-5 stellt den Ausgangszustand des Systems dar, der zweite Term repräsentiert die Änderung des Kräftegleichgewichts unter Einfluss von Störgrößen. Die Lage der optischen Achse, bezogen auf den Ausgangszustand, bleibt dann unverändert, wenn der zweite Term von Gl. 6-5 auf beiden Seiten gleich groß ist. Diese Bedingung findet Ausdruck in Gl. 6-6.

$$c_1 \cdot \Delta s_1 = c_2 \cdot \Delta s_2 \quad \text{Gl. 6-6}$$

In der Praxis wird dies der Fall sein, wenn die Federsteifigkeiten c und die Längen Δs auf beiden Seiten gleich groß sind. Auf diese Bedingung hin muss bei der praktischen Umsetzung optimiert werden. Hinsichtlich der Länge s bzw. Δs ergeben sich die Forderungen, den Aufbau symmetrisch zur optischen Achse und im Besonderen die Klebstoffvolumina gleich groß zu gestalten.

Die Federsteifigkeit der Teilsysteme setzt sich, wie bereits erwähnt, aus einer Reihenschaltung der Federsteifigkeiten der einzelnen Konstruktionselemente nach Gl. 6-7 zusammen.

$$\frac{1}{c_{\text{Gesamt}}} = \frac{1}{c_{\text{Fassung}}} + \frac{1}{c_{\text{Kleber}}} + \frac{1}{c_{\text{opt. BE}}} \quad \text{Gl. 6-7}$$

Die Steifigkeit des optischen Bauelementes kann in der praktischen Umsetzung in der Regel nicht beeinflusst werden. Die Steifigkeit der Fassung wird durch die Auslegung der Festkörpergelenke bestimmt, die Steifigkeit des Klebers kann durch dessen Auswahl in begrenztem Maße beeinflusst werden. In der Praxis sind sowohl die Federsteifigkeiten der Fassung als auch die Federsteifigkeiten des Klebers in den beiden Teilsystemen nicht vollständig gleich. Ursache hierfür sind Fertigungsabweichungen bei der Fassung und Inhomogenitäten im Klebstoff. Durch Extremwertbetrachtungen kann aus Gl. 6-7 abgeleitet werden, dass die Gesamtsteifigkeit durch die Steifigkeit der Elemente mit geringer Federsteifigkeit dominiert wird. Elemente mit hoher Steifigkeit haben nur geringen Einfluss. Dies kann wiederum genutzt werden, um die Wirkung der Gesamtanordnung zu optimieren. Durch eine geringe Steifigkeit der Fassung und eine hohe Steifigkeit des Klebers kann der Einfluss von Kleberinhomogenitäten auf die Gesamtanordnung minimiert werden. Durch eine hohe Steifigkeit der Fassung und eine geringe Steifigkeit des Klebers wird der Einfluss von Fertigungstoleranzen der Fassung speziell der Festkörpergelenke klein gehalten.

Zusammenfassend lassen sich für die in Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13 dargestellte Anordnung folgende allgemeine Aussagen treffen:

1. Das Wirkprinzip beruht auf der zentralsymmetrischen Anordnung von Funktionselementen mit definierten Eigenschaften, diese Funktionselemente sind Festkörpergelenke.
2. Durch die auslegbaren Eigenschaften der Festkörpergelenke kann die Höhe der auf das optische Bauelement einwirkenden Kräfte gezielt begrenzt werden.
3. Durch Nutzung von Festkörpergelenken können gleitreibungsbehaftete Relativbewegungen in den mechanischen Koppelstellen von Verbindungen vermieden werden. Hierzu muss die Steifigkeit der Koppelstellen höher sein als die Steifigkeit der Festkörpergelenke.

Eine andere Möglichkeit, mit temperaturbedingten Volumenänderungen in OHS umzugehen, ist durch das **Konstruktionsprinzip der Kompensation** gegeben. Hierzu wird ein technisches Gebilde so aufgebaut, dass eine Störgröße auf zwei sich unter Störgrößeneinfluss gegenläufig ändernde Strukturparameter wirkt. Derartige Einrichtungen finden vorwiegend bei der Beseitigung oder Herabsetzung von Temperatureinflüssen Anwendung und beruhen auf der Kombination von Werkstoffen unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten, die so zueinander angeordnet sind, dass sich temperaturbedingte Volumenänderungen durch gezielte Überlagerung kompensieren. Diese sogenannten Kompensationsfassungen sind jedoch aufgrund der Notwendigkeit zusätzlicher Strukturelemente mit erheblichem Aufwand verbunden und werden deshalb hauptsächlich bei sehr hohen Temperaturschwankungen und bei großen Abmessungen der optischen Bauelemente eingesetzt. Für die Anwendung in OHS kleiner Durchmesser stellen sie eine grundsätzliche Lösungsmöglichkeit dar, sind aber für die technische Realisierung wenig praktikabel. Auf eine Darstellung wird deshalb verzichtet und auf die Literatur verwiesen [Schill82], [Thes03], [Yod05].

Grundsätzlich ist die Anwendung der Konstruktionsprinzipien der Gerätetechnik nach Schilling allgemein anzustreben. Die in diesem Rahmen durch den Autor durchgeführte Betrachtung soll deren Anwendung im Rahmen des Fassens optischer Bauelemente exemplarisch belegen und die praktische Umset-

zung erleichtern. Die dargestellten Beispiele wurden so gewählt, dass sie OHS-relevante Problemfelder betreffen.

6.4.5 Zusammenfassung

Entsprechend der durchgeführten Betrachtungen ist eine Möglichkeit für die Entwicklung eines vollständigen Lösungsraumes zur Gestaltung mechanischer Verbindungen durch systematische Variation und Kombination der Elemente „Koppelstellen einer Verbindung“ und „Sicherung einer Verbindung“ gegeben. In den zurückliegenden Abschnitten wurde dieser Lösungsraum für die Anwendung zum unmittelbaren Fassen optischer Bauelemente systematisch erarbeitet. Für die konstruktive Umsetzung des Lösungsraumes wurde die Anwendung feinwerktechnischer Konstruktionsprinzipien exemplarisch demonstriert. Die in diesem Zusammenhang gewonnenen Erkenntnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Die Koppelstellen für das unmittelbare Fassen sind so zu gestalten, dass Zwang vermieden wird, dies heißt, zwangfreie oder zwangarme Anordnungen sind zu bevorzugen.

Für die Sicherung der Verbindung wurde zwischen kraft-, form- und stoffschlüssigen Verbindungsbestandteilen unterschieden. Kraftschlüssige Verbindungsbestandteile sind sowohl hinsichtlich der Spannungsarmut als auch hinsichtlich der Lagestabilität für das Fassen optischer Hochleistungsbaulemente nicht geeignet. Ihr Funktionsprinzip beruht auf der Sicherung durch Reibkräfte in den Fügeflächen der beteiligten Elemente. Zur Erzeugung dieser Reibkräfte sind stets wirkende Normalkräfte notwendig, welche sich negativ auf die Spannungsarmut auswirken.

Formschlüssige Verbindungsbestandteile bieten die Möglichkeit einer Sicherung mit kleinen Normalkräften und können zwangarm oder zwangfrei gestaltet werden, dadurch sind sie grundsätzlich zum unmittelbaren Fassen in OHS geeignet.

Stoffschlüssige Verbindungsbestandteile auf Basis von Klebeverbindungen sind hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit in optischen Hochleistungssystemen

men limitiert. Besonders die Sensibilität aktueller Klebstoffe hinsichtlich der betriebsbedingten Störgrößen Temperaturgang, Feuchtigkeit und Strahlung wirkt einschränkend. Die dargestellten konstruktiven Maßnahmen können diese Nachteile bedingt kompensieren.

Stoffschlüssige Verbindungsbestandteile auf Basis des Lötens bieten Potenzial zur Anwendung in optischen Hochleistungssystemen. Besonders die Stabilität metallischer Lote im Hinblick auf die wesentlichen auftretenden Störgrößen lässt eine hohe und dauerhafte Lagestabilität erwarten. Für die Anwendung von Lötverfahren zum Aufbau mikrooptischer Systeme liegen veröffentlichte Ergebnisse vor. Im Rahmen der für die Mikrooptik üblichen Anforderungen hinsichtlich Spannungsarmut und Lagestabilität konnte die Eignung von Lötverbindungen bereits nachgewiesen werden [Bans05]. Weitere Anwendungsfelder im Bereich der konventionellen Optik sind hauptsächlich durch Veröffentlichungen in der Patentliteratur bekannt [HDD98], [TaHo08]. Veröffentlichte Ergebnisse, welche die erwarteten positiven Eigenschaften hinsichtlich der Anwendbarkeit in OHS belegen, liegen aktuell nicht vor.

Für die konstruktive Gestaltung sind die Problemfelder „Umgang mit Kräften“ und „Umgang mit Relativbewegungen“ von besonderer Bedeutung. Das Einwirken von Kräften auf das optische Bauelement lässt sich begrenzen durch Prinzipien der kurzen und direkten Kraftleitung, durch zwangarme oder zwangsfreie Anordnungen und durch federnde Anordnungen. Zur Beherrschung störgrößenbedingter Relativbewegungen ist die Anwendung vollständig bestimmter, eindeutiger Anordnungen sinnvoll. Gleitreibungsbehaftete Relativbewegungen können durch die Nutzung von Festkörpergelenken vermieden werden.

Zur Dokumentation der Anwendungsmöglichkeiten des gegebenen Lösungsraumes für die Entwicklung und konstruktive Gestaltung von mechanischen Verbindungen im Allgemeinen und zum unmittelbaren Fassen optischer Bauelemente im Speziellen soll im folgenden Abschnitt exemplarisch die Gestaltung und Charakterisierung einer Verbindung für den Einsatz zum unmittelbaren Fassen in OHS erfolgen.

6.5 Statisch bestimmte Fassungschnik

6.5.1 Einführung

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt festgestellt, finden im Rahmen der Konstruktionswissenschaften zur Lösungssuche diskursive und intuitive Verfahren Anwendung. Die Erarbeitung des Lösungsraumes im Abschnitt 6.4 erfolgte nach einer systematischen, diskursiven Vorgehensweise. Durch seine charakterisierenden Kriterien enthält er eine Vielzahl von Lösungselementen, die zu einer Gesamtlösung kombiniert werden können. Die Kombination der Lösungselemente kann wiederum unter diskursiven oder intuitiven Gesichtspunkten erfolgen. Im Folgenden wird eine Lösungsidee für das spannungsarme unmittelbare Fassen vorgestellt, die im Rahmen der Bearbeitung des Themas durch Analogiebetrachtungen entstanden ist.

Zur Verdeutlichung der grundsätzlichen Funktionsweise soll Abbildung 6-14 dienen, sie zeigt die Position einer Kugel in einer Kugelpfanne. Die Sollposition der Kugel ist durch die Form der Pfanne eindeutig bestimmt und befindet sich an deren tiefster Stelle. In dieser Sollposition wirkt nur die eigene Gewichtskraft der Kugel auf die Kugel. Erst wenn die Kugel durch äußere Kräfte ausgelenkt wird und ihre Sollposition verlässt, erfährt sie eine rückstellende Kraft in Richtung ihrer Sollposition.

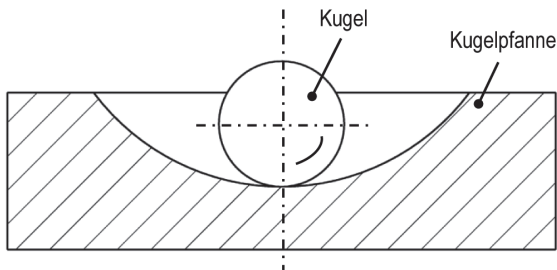


Abbildung 6-14 Anordnung Kugel – Kugelpfanne

Allgemein ist dieses Prinzip durch eine eindeutig definierte Sollposition und Kräfte zur Sicherung charakterisiert, die nur wirken, wenn die Sollposition verlassen wird. Seine Anwendung auf das unmittelbare Fassen optischer Bauelemente soll im Folgenden gezeigt werden.

6.5.2 Formulierung der Konstruktionsaufgabe

Für die konstruktive Umsetzung sollen nachfolgend qualitative Forderungen formuliert werden. Ursprung dieser Forderungen sind die funktionellen Anforderungen nach Kapitel 5.3, die umzusetzende Grundidee und Ergebnisse aus der Analyse des Standes der Technik.

1. Fassung mit eindeutig definierter Sollposition des optischen Elementes.
2. Spannungsarm durch kleine wirksame Kräfte in der Sollposition, rückstellende Kraftwirkung nur beim Verlassen der Sollposition.
3. Spannungsarm durch kurzen Kraftfluss, Kraftfluss nicht durch optisch wirksame Fläche.
4. Unempfindlich gegen Störgrößen durch statisch bestimmten Aufbau.
5. Unempfindlich gegen Feuchtigkeit und Strahlung durch die Verwendung von Werkstoffen, die hinsichtlich dieser Störgrößen unempfindlich sind.
6. Lagestabil bei Temperaturgang durch einen bezüglich der optischen Achse zentralsymmetrischen Aufbau.

6.5.3 Konzept

Mithilfe der Forderungen aus dem vorhergehenden Abschnitt lässt sich der vollständige Lösungsraum gezielt auf die Elemente eingrenzen, welche zur Erfüllung notwendig sind.

Um eine eindeutige Lagedefinition durch mechanische Flächen zu erreichen, müssen alle sechs Freiheiten der Bewegung durch Koppelstellen mit geeigneten geometrischen Paarungen der Wirkflächen gesperrt werden. Aus dem

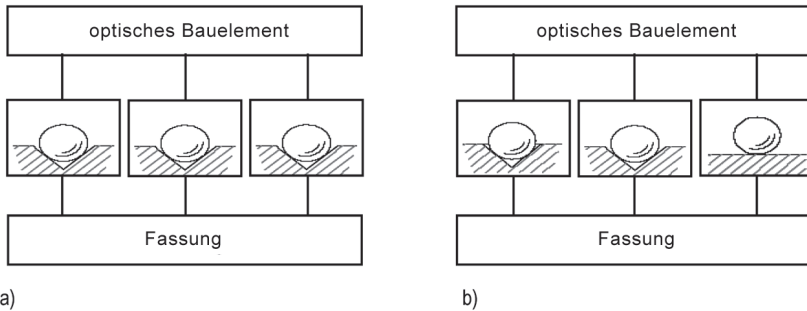


Abbildung 6-15 Schematische Darstellung der Anordnungen mit $F=0$ und axialer Fügerichtung a) 3 × Koppelstelle Kugel – V-Nut
b) 1 × Koppelstelle Kugel – Kegel, 1 × Koppelstelle Kugel – V-Nut, 1 × Koppelstelle Kugel – Ebene

Koppelstellenkatalog nach [Mooz07] sind dementsprechend nur Anordnungen mit $F=0$ geeignet. Um einen kurzen und direkten Kraftfluss zu erreichen, welcher nicht durch die optischen Wirkflächen geschlossen wird, sind ausschließlich Anordnungen mit axialer Fügerichtung nutzbar. Damit schränkt sich die Auswahl auf die beiden schematisch in Abbildung 6-15 dargestellten Anordnungen ein.

Zum Aufbau einer festen mechanischen Verbindung entsprechend der Anordnungen in Abbildung 6-15 ist es notwendig, die Fügerichtung zu sichern. Für die Sicherung der Fügerichtung sind formschlüssige Verbindungsbestandteile geeignet. Hierbei muss beachtet werden, dass die Sperrung der Fügerichtung zwangarm oder zwangfrei und federnd erfolgen muss (vgl. Kapitel 6.4.3). Für die technische Realisierung kommen die Anordnungen entsprechend Abbildung 6-16 in Betracht.

Die Anordnung entsprechend Abbildung 6-16 a) beruht auf dem Konstruktionsprinzip der Funktionstrennung. Die Koppelstellen zur eindeutigen Lagedefinition sind strukturell getrennt von den Koppelstellen zur Lagesicherung angeordnet. Die Koppelstellen zur Lagesicherung haben in Anordnung a) lediglich die Funktion, die sichernden Kräfte zu übertragen. Der Aufbau dieser Anordnung ist zwangarm, da die Koppelstellen zur Lagesicherung nur über

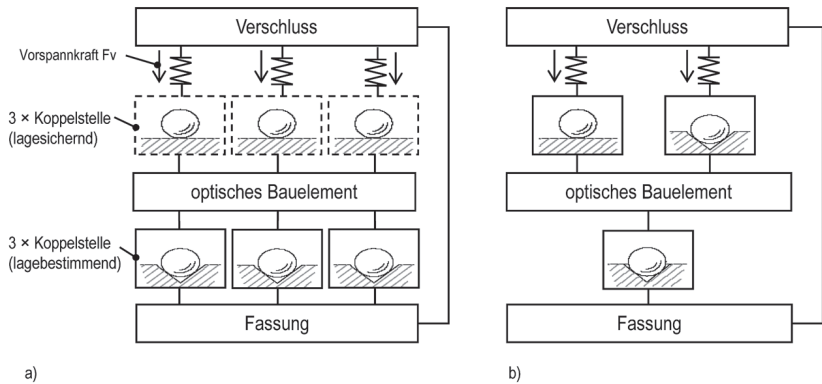


Abbildung 6-16 Schematische Darstellung der Anordnungen mit $F=0$ und gesperrter Fügerichtung a) 3 x Koppelstelle Kugel – V-Nut – Sicherung zwangarm b) 1 x Koppelstelle Kugel – Kegel, 1 x Koppelstelle Kugel – V-Nut, 1 x Koppelstelle Kugel – Ebene – Sicherung zwangfrei

Reibkräfte lagedefinierend wirken und keine Einschränkung für die Lagebestimmung darstellen. Der Vorteil dieser Anordnung liegt in einem zur optischen Achse symmetrischen Aufbau.

Anordnung b) beruht auf dem Konstruktionsprinzip der Funktionsintegration und hat den Vorteil, dass sie zwangfrei aufgebaut ist und damit auch dem Konstruktionsprinzip eindeutig entspricht. Die Koppelstellen übernehmen in dieser Anordnung sowohl die Lagedefinition als auch die Lagesicherung durch Einprägen der Sicherungskräfte. Für die technische Realisierung dieser Anordnung sind zwei Punkte als kritisch anzusehen. Die Koppelstelle Kugel – Kegel hat bei idealer Betrachtung eine Linienberührung. In ihrer technischen Realisierung über die sphärische Fläche einer Linse und die Ringschneide einer Fassung kann es durch herstellungsbedingte geometrische Fehler der beteiligten Wirkflächen zu undefinierten Kontaktzuständen und – abhängig von der Größe der wirkenden Sicherungskräfte – zu Deformationen kommen. Dies lässt sich durch eine unterbrochene Ausführung der Ringschneide mit definiert kleinen

Kontaktbereichen (vgl. Abschnitt 4.3) verringern. Die Anordnung der Koppelstellen Kugel – Ebene und Kugel – V-Nut darf nicht in einer Ebene mit dem Krümmungsmittelpunkt der sphärischen Fläche der Koppelstelle Kugel – Kegel liegen, weil sonst eine Freiheit der Rotation nicht durch Koppelstellen gesperrt wird. Aus dieser Bedingung ergibt sich für die technische Realisierung ein stark von der Symmetrie zur optischen Achse abweichender Aufbau entsprechend Abbildung 6-11 c).

Aufgrund der konzeptionellen Vorteile soll Anordnung a) im Weiteren zunächst analytisch, anschließend konstruktiv und experimentell untersucht werden.

6.5.4 Analytische Untersuchungen

Ziel dieses Kapitels ist es, die im vorherigen Abschnitt abgeleitete Anordnung analytisch zu charakterisieren. Die ermittelten Zusammenhänge stellen eine wesentliche Grundlage für das Verständnis dieses Fassungssystems dar und bilden die Basis für Auslegung und Optimierung.

Der konstruktive Aufbau ist durch die dreifache Anordnung der Koppelstelle Kugel – V-Nut gekennzeichnet. Diese Anordnung ist allgemein als statisch bestimmt bekannt und in zahlreichen Arbeiten wie beispielsweise [Schill82], [Vuko97], [Blan99], [Yod08] für den Einsatz im Gerätebau veröffentlicht. [Sloc92a], [Sloc92b], [HaSl01] stellen Verfahren zur Bewertung und Auslegung der Stabilität derartiger Anordnungen vor. Die Darstellungen zielen dabei vor allem auf die Gestaltung unter den Gesichtspunkten hoher zu übertragender Kräfte und hoher Wiederholgenauigkeit beim Fügen ab. Für die Anwendung der dreifachen Anordnung der Koppelstellen Kugel – V-Nut zum unmittelbaren Fassen optischer Bauelemente sollen im Folgenden ergänzende Untersuchungen durchgeführt werden. Entsprechend der Darstellung in Kapitel 4 werden Funktionsfähigkeit und Eigenschaften mechanischer Verbindungen von verschiedenen konstruktiven Faktoren bestimmt. Zur Festlegung dieser Faktoren sollen die folgenden Gesichtspunkte betrachtet werden:

- Vorspannkraft F_V zur Sicherung der Fögerichtung,
- Gestaltung der V-Nut hinsichtlich entstehender Normalkräfte und
- Gestaltung der V-Nut hinsichtlich Selbsteinstellung bei Auslenkung durch Störgrößen.

Um Relativbewegungen zwischen optischem Bauelement und Fassung zu verhindern, müssen angreifende äußere Kräfte sowie die Gewichtskraft des optischen Bauelementes von den Koppelstellen aufgenommen werden können. Die auf das optische System maximal wirkenden äußeren Kräfte treten im Rahmen von Handling- und Transportprozessen in Form von Stößen auf. Die Höhe dieser Belastungen für ein konkretes System ist im Rahmen einer Spezifikation (siehe Kapitel 5) durch definierte maximale Transportbeschleunigungen a_{TP} festgelegt. Aus der maximal auftretenden Beschleunigung lässt sich die Kraft zur Sicherung dieser nach Gl. 6-8 ermitteln.

$$F_{TP} = m_{oBE} \cdot a_{TP} \quad \text{Gl. 6-8}$$

In einem System, in dem alle Bewegungsfreiheiten formschlüssig definiert sind, besteht für die sichernde Kraft die Aufgabe, den Kontakt der mechanischen Wirkflächen zu gewährleisten. Damit ergibt sich die notwendige Vorspannkraft direkt aus der Gewichtskraft und der Kraft zur Sicherung der Transportbeschleunigungen nach Gl. 6-8, multipliziert mit einem anwendungsspezifischen Sicherheitsfaktor.

$$F_V = m_{oBE} \cdot (g + a_{TP}) \cdot s_f \quad \text{Gl. 6-9}$$

Entsprechend Gl. 6-9 liegt für die konstruktive Umsetzung die zu erzeugende minimale Vorspannkraft F_V fest. Diese Vorspannkraft kann weiterführend im Rahmen einer FEM-Analyse zur Ermittlung des Spannungszustandes verwendet werden.

Für die Anwendung von OHS wurde eine Unterscheidung zwischen den im Betrieb und den im Rahmen von Transport- und Lagerprozessen wirkenden Störgrößen getroffen. Für im Rahmen von Transport und Lagerung unter

Störgrößeneinfluss hervorgerufene Änderungen gilt die Forderung, dass diese reversibel sein müssen. Im Betrieb werden durch geeignete Maßnahmen äußere Kräfte vom System entkoppelt (siehe Kapitel 5). Dies bedeutet für eine spannungsarme Fassung nach dem hier dargestellten Konzept, dass im Betriebsfall über die Vorspannkraft nur der mechanische Kontakt in den Koppelstellen gegen das Wirken der Gewichtskraft des optischen Bauelementes gesichert werden muss und dies auch nur in Einbaulagen, in denen die Gewichtskraft nicht in Richtung der lagebestimmenden Koppelstellen wirkt. Somit hat die Auslegung der Vorspannkraft so zu erfolgen, dass die spannungsarme Sollposition für den Betrieb des Systems der Gewichtskraft des optischen Bauelementes entspricht und Auslenkungen unter Nichtbetriebsbedingungen durch starke rückstellende Kräfte in die spannungsarme Sollposition erfolgen.

In welcher Art und Weise sich auch geringe Vorspannkräfte auf das optische Bauelement in Form von Spannungen auswirken, ist wesentlich von der Gestaltung der V-Nut abhängig. Die Betrachtung der V-Nut in senkrechter Richtung zum Verlauf der Nut ergibt einen in Abbildung 6-17 a) schematisch dargestellten Aufbau.

Ein Freischneiden des Systems ergibt den in Abbildung 6-17 b) dargestellten Zustand, in Abbildung c) ist der zugehörige Kräfteplan dargestellt. Für die Beträge der Auflagekräfte F_{A1} und F_{A2} ergibt sich die Gleichung Gl. 6-10.

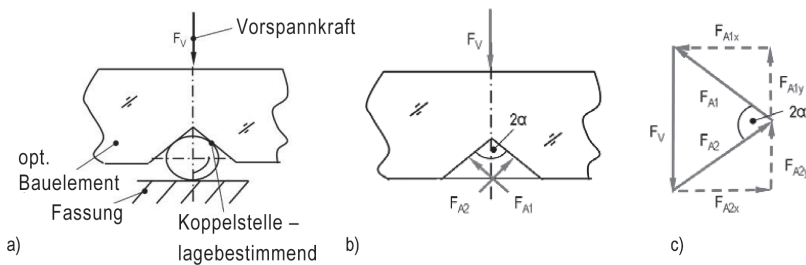


Abbildung 6-17 V-Nut a) schematischer Aufbau b) freigeschnittenes System
c) Kräfteplan

$$F_{A1} = F_{A2} = \frac{F_V}{2 \cdot \sin(\alpha)} \quad \text{Gl. 6-10}$$

F_{A1} und F_{A2} lassen sich über geometrische Beziehungen in ihre Komponenten aufteilen für die Komponenten F_{A1x} und F_{A2x} gilt Gleichung Gl. 6-11.

$$F_{A1x} = -F_{A2x} = \frac{F_V}{2 \cdot \tan(\alpha)} \quad \text{Gl. 6-11}$$

Sowohl aus Abbildung 6-17 c) als auch in Gl. 6-11 wird ersichtlich, dass mit kleiner werdendem Winkel 2α bei konstanter Vorspannkraft F_V die senkrecht zu F_V wirkenden Kraftkomponenten F_{A1x} und F_{A2x} immer größer werden. Führt man eine Extremwertbetrachtung für F_{Ax} durch, in welcher $\alpha \rightarrow 0$ geht, so geht $F_{Ax} \rightarrow \infty$. Der Kraftkreis für F_{Ax} wird direkt durch das optische Bauelement geschlossen. Um diese Kräfte möglichst klein zu halten, sollte dementsprechend der Öffnungswinkel der V-Nut möglichst groß gewählt werden. Um eine selbsteinstellende Wirkung der V-Nut bei Auslenkungen zu erreichen, sollte jedoch 2α einen bestimmten Maximalwinkel nicht überschreiten. Eine vereinfachte Darstellung des Sachverhaltes ist in Abbildung 6-18 gegeben. Die sich ergebende Anordnung entspricht in ihrem Grundaufbau einer schiefen Ebene. Die Vorspannkraft führt zum einen zu einer Normalkraft senkrecht zur Wirkfläche der V-Nut, dies ist die Auflagekraft F_{A1} , und zum anderen zu einer resultierenden Kraft in Richtung der Wirkfläche, diese Kraft F_{Ein} ist die Ursache für die Einstellbewegung. Der Einstellbewegung entgegen wirkt eine Reibkraft F_{Reib} , welche durch die Auflagekraft F_{A1} erzeugt wird. Entsprechend Abbildung 6-18 ergibt sich eine Selbsteinstellung des Systems, wenn die Bedingung nach Gl. 6-12 erfüllt ist.

$$F_{Ein} > F_{Reib} \quad \text{Gl. 6-12}$$

Mit Gl. 6-13 und 6-14 für F_{Ein} und F_{Reib} ergeben sich aus Gl. 6-12 für die Selbsteinstellung des Systems Gl. 6-15 und Gl. 6-16.

$$F_{\text{Reib}} = \mu \cdot F_{A1} \quad \text{Gl. 6-13}$$

$$F_{\text{Ein}} = \frac{F_{A1}}{\tan \alpha} \quad \text{Gl. 6-14}$$

$$\frac{F_{A1}}{\tan \alpha} > F_{A1} \cdot \mu \quad \text{Gl. 6-15}$$

$$\alpha < \arctan \frac{1}{\mu} \quad \text{Gl. 6-16}$$

In der grafischen Darstellung nach Abbildung 6-18 c) ist eine Selbsteinstellung des Systems solange gewährleistet, wie F_V nicht den aus F_{A1} und F_{Reib} aufgespannten und durch den Reibwinkel ϱ gegebenen Bereich schneidet. Ist die in Gl. 6-16 gegebene Bedingung erfüllt, kann die Anordnung unter Einfluss von Störgrößen eine Auslenkung erfahren, die reversibel ist. Mithilfe von Gl. 6-16 lässt sich bei bekannten Reibkoeffizienten ein maximaler Winkel α ermitteln, für welchen die Anordnung noch selbsteinstellend ist. Exemplarisch sei hier für einen Haftreibungskoeffizienten von Stahl auf Glas $\mu = 0,3$ der Öffnungswinkel

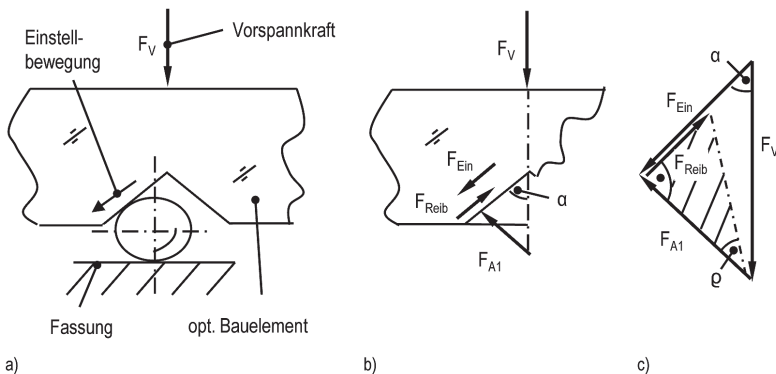


Abbildung 6-18 Kugel – V-Nut bei Auslenkung a) schematischer Aufbau
b) freigeschnittenes System c) Kräfteplan

$2\alpha < 146^\circ$ gegeben. Einschränkend sollten jedoch nach [Rauc83] globale Reibfaktoren für die Ermittlung des Bewegungsverhaltens von Systemen aufgrund von Ungenauigkeiten nicht verwendet werden. Daraus resultiert die Notwendigkeit, den Reibwert für jedes technische System individuell experimentell zu ermitteln oder entsprechend Sicherheiten im Rahmen der Auslegung vorzuhalten. Untersuchungen zu den tatsächlichen Reibkoeffizienten bei der Paarung verschiedener Metall-Glas-Oberflächen sind nicht Bestandteil dieser Arbeit; hierzu wird auf die Literatur [Krau04], [Lehr98], [Rau83] verwiesen.

Für den Fall von Temperaturgang ist zusätzlich zu klären, für welche Winkel 2α die Anordnung selbstsperrend ist, wobei diese Betrachtung allgemein für eine Anpassungsfähigkeit der Anordnung an eine Volumenänderung der beteiligten Elemente durchgeführt wird und Temperaturänderung eine mögliche Ursache für diese Zustandsänderung sein kann (vgl. auch Abbildung 6-6). Hierzu wird erneut eine Betrachtung der V-Nut in senkrechter Richtung zum Verlauf der Nut durchgeführt. Ändert sich unter Einfluss von Störgrößen das Volumen der in Kontakt stehenden Bauelemente, kommt es zu einer Situation entsprechend Abbildung 6-19.

Hinsichtlich der Anpassungsfähigkeit der Anordnung sind die Zustände kritisch, die bei ungünstiger Anordnung der Wirkflächen zu einer Selbstsper-

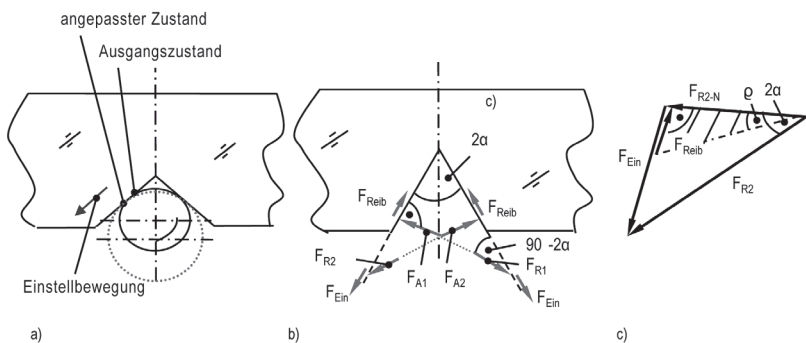


Abbildung 6-19 Selbsteinstellung Kugel – V-Nut bei Volumenänderung
a) schematischer Aufbau b) freigeschnittenes System
c) Kräfteplan – linkes Schnittufer

ung führen können. Dies sind zum einen Volumenänderungen, bei denen das Volumen der Kugel stärker wächst als das Volumen des optischen Bauelementes, und zum anderen Volumenänderungen, bei denen das Volumen des optischen BE stärker schrumpft als das der Kugel. Um diese Volumenänderungen zu kompensieren, muss sich die Koppelstelle anpassen können, hierzu ändert sich die Position der Kontaktstellen zwischen Kugel und V-Nut. Die Änderung der Kontaktstellen erfolgt durch eine Gleitbewegung, die Anpassungsfähigkeit der Koppelstelle lässt sich deshalb durch die Betrachtung des Kräftegleichgewichts bei der Einstellbewegung beschreiben. Hierzu ist es ausreichend, ein Schnittufer des freigeschnittenen Systems nach Abbildung 6-19 c) zu untersuchen. Für die Selbsteinstellung der Koppelstelle muss Gl. 6-12 erfüllt sein. Entsprechend den vorliegenden geometrischen Bedingungen lassen sich alle Kräfte in Abhängigkeit der Reaktionskräfte F_R ausdrücken. Diese Reaktionskräfte resultieren aus den Auflagekräften F_A . Mithilfe von Gl. 6-17 und Gl. 6-18 ergeben sich aus Gl. 6-12 die Gleichungen Gl. 6-19⁶ und Gl. 6-20.

$$F_{Ein} = F_{R2} \cdot \sin(2\alpha) \quad \text{Gl. 6-17}$$

$$F_{Reib} = \mu \cdot F_{R2} \cdot \cos(2\alpha) \quad \text{Gl. 6-18}$$

$$\tan(2\alpha) > \mu \quad \text{Gl. 6-19}$$

$$2\alpha > \arctan \mu \quad \text{Gl. 6-20}$$

Ist Gl. 6-20 erfüllt, kann sich die Anordnung bei Temperaturgang anpassen. Für Öffnungswinkel $2\alpha \geq 90^\circ$ ist die Anordnung unabhängig vom Reibkoeffizienten nicht selbstsperrend, da F_R keinen Anteil mehr aufweist, der senkrecht zur Wirkfläche der V-Nut gerichtet ist und entsprechend Gl. 6-18 eine Reibkraft erzeugt.

6 Gl. 6-19 entspricht der nach [Krau00] für den Reibwinkel ϱ bekannten Gleichung $\mu = \tan \varrho$.

Mit den dargestellten analytischen Untersuchungen liegen Berechnungsmöglichkeiten für den Öffnungswinkel der V-Nut als wesentlichen, die Eigenschaften der Koppelstelle bestimmenden Parameter vor.

6.5.5 Konstruktionsentwurf

[Hans74], [Schil82], [Höhn00] bezeichnen den konstruktiven Entwicklungsprozess als einen iterativen Prozess der Informationsverarbeitung, der zu einer geometrisch stofflichen Beschreibung eines technischen Gebildes führt. Im Rahmen eines solchen Prozesses wurde in den vergangenen Abschnitten eine Ermittlung der Funktion und des technischen Prinzips vorgenommen; damit wurden die Rahmenbedingungen für die konstruktive Umsetzung festgelegt. Ihrem Wesen nach ist die konstruktive Umsetzung mehrdeutig, das heißt, für die Realisierung einer Funktion sind verschiedene konstruktive Umsetzungen möglich [Schil82], [Sper82]. Im Folgenden soll sich deshalb exemplarisch auf die Darstellung einer Möglichkeit der konstruktiven Umsetzung nach Abbildung 6-20 beschränkt werden.

Die Lagebestimmung erfolgt in der konstruktiven Ausführung nach Abbildung 6-20 durch die dreifache Anordnung der Koppelstelle Kugel – V-Nut. Die V-Nut ist hierzu im optischen Bauelement ausgebildet,⁷ die Kugeln sind fest mit der Fassung, beispielsweise durch Löten oder Laserschweißen, verbunden. Die Sicherung der Fügerichtung erfolgt über einen Deckel, an dem durch Laserschweißen Blattfedern befestigt sind. Die Anordnung der Koppelstellen ist symmetrisch zur optischen Achse auf $3 \times 120^\circ$ über den Umfang verteilt. Die Befestigung der Blattfedern an einem gemeinsamen Deckel ist vorteilhaft, weil so sichergestellt wird, dass auf alle Koppelstellen die Vorspannkraft in gleicher Höhe wirkt. Dadurch wird die Forderung nach symmetrischem Aufbau nicht nur in geometrischer, sondern auch in Hinsicht der Kraftwirkung erfüllt. Der

7 Das Anbringen der Nuten im optischen BE stellt aus technologischer Sicht keinen oder nur einen geringen Mehraufwand dar, da es im Rahmen der Herstellung des optischen BE in den Prozessschritt der Randbearbeitung integriert werden kann.

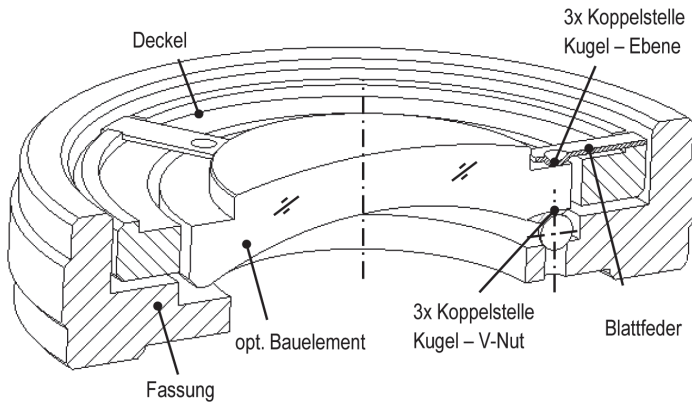


Abbildung 6-20 Statisch bestimmte Fassungstechnik – Konstruktionsentwurf

Deckel mit den Blattfedern hat in der Fassung Spiel, hierdurch kann er seine Position entsprechend der Lage des optischen Bauelementes ausbilden. Die Vorspannkraft kann durch analytische Untersuchungen des Temperaturwechselbereiches, durch FEM- oder experimentelle Untersuchungen gewonnen werden.

Eine exemplarische Darstellung der mechanischen Spannungen im optischen Bauelement und der Oberflächen deformation unter Einfluss verschiedener Vorspannkraften ist in Abbildung 6-21 gegeben. Anhand der Variation der Vorspannkraften werden die vorteilhaften Eigenschaften der genutzten Konstruktionsprinzipien deutlich sichtbar. Durch das Prinzip des kurzen und direkten Kraftflusses wird die Wirkung der Vorspannkraft in Form von Spannungen auf einen sehr kleinen Bereich im optischen Bauelement begrenzt. Durch das Prinzip des Vermeidens von Überbestimmtheiten entstehen keine Zwangskräfte im optischen Bauelement. Eine Deformation der optischen Wirkfläche wird selbst bei einer sehr hohen Vorspannkraft von 30 N wirksam verhindert. Die dargestellte Verschiebung zeigt für diesen Zustand keine schädliche Deformation der optischen Wirkflächen in Form von ungleichmäßig auftretenden Verformungen, sondern nur einen gleichmäßigen Versatz.

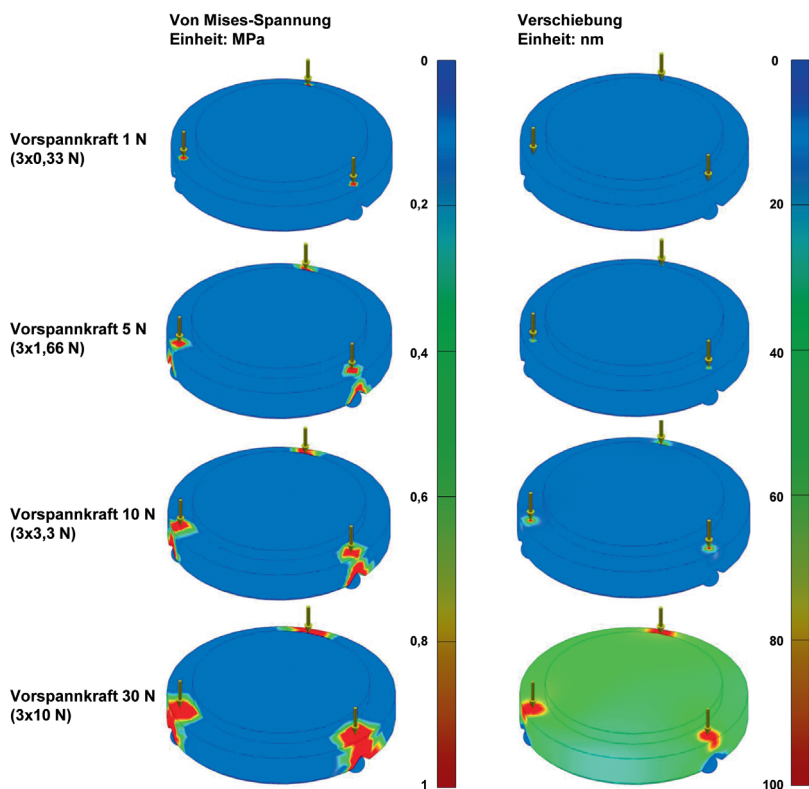


Abbildung 6-21 Spannungszustand und Deformation des optischen Bauelementes bei verschiedenen Vorspannkraften

Für die praktische Realisierung ist durch Fertigungs- und Montageabweichungen nicht mit ideal zu den Koppelstellen angreifenden Normalkräften zu rechnen. Diese führen abhängig vom Abstand des Kraftangriffspunktes zur Koppelstelle zu zusätzlichen Spannungen im optischen Bauelement und durch entstehende Biegemomente zu einer Deformation. Eine exemplarische Darstellung des Einflusses der Lage der Kraftangriffspunkte ist in Abbildung 6-22

gegeben. Bei einer festen Vorspannkraft von 10 N ($3 \times 3,3$ N) wurden die Kraftangriffspunkte definiert zu den Koppelstellen verdreht. Es zeigt sich, dass kleine Verdrehungen sowohl hinsichtlich des Spannungszustandes als auch hinsichtlich der Deformation unkritisch sind. Mit zunehmender Verdrehung steigen jedoch die Auswirkungen auf das optische Bauelement. Der dargestellte

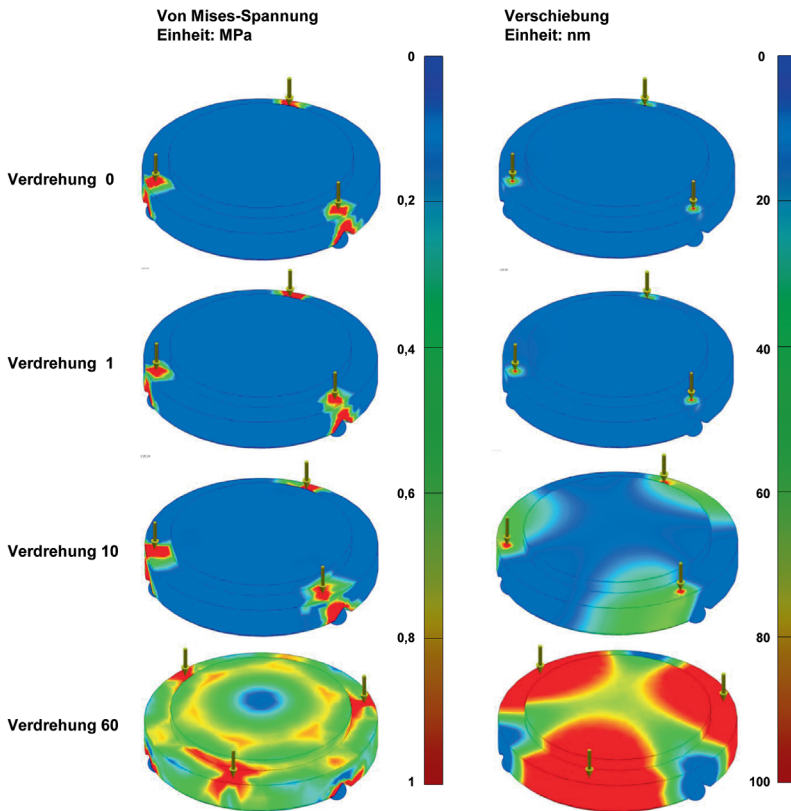


Abbildung 6-22 Spannungszustand und Deformation des optischen Bauelementes in Abhängigkeit vom Kraftangriffspunkt der Vorspannkraft ($3 \times F = 3,3$ N)

Extremfall der Kraftangriffspunkte genau zwischen den Koppelstellen ist in der Praxis nicht zu erwarten, zeigt aber sehr deutlich, wie weit diese Auswirkungen gehen können.

Die durchgeführten FEM-Analysen sind in ihren Aussagen als qualitativ zu betrachten. Um über FEM-Untersuchungen absolute Voraussagen zur Deformation und zum Spannungszustand bestimmter Fassungstechniken treffen zu können, müssten die verwendeten Modelle und Parameter durch experimentelle Untersuchungen überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Dies ist nicht Inhalt dieser Arbeit, sondern als eigenständiges Themenfeld für weitergehende wissenschaftliche Untersuchungen zu sehen.

Für die experimentellen Untersuchungen wurde eine Vorspannkraft von 5 N gewählt. Zur einfachen Erzeugung dieser Vorspannkraft in definierter Höhe wird ein entsprechendes Gewicht auf den Deckel (siehe auch Abbildung 6-20) aufgelegt und dieser in vorgespannter Position durch Kleben gesichert. Die begrenzenden Eigenschaften von Klebeverbindungen kommen bei der Sicherung des Deckels durch Kleben nicht zum Tragen, da kein direkter Kontakt zum optischen Bauelement besteht und deshalb beim Aushärten keine Spannungen in dieses übertragen werden können. In die Funktionskette der Lagedefinition ist der Kleber nur mittelbar einbezogen, deshalb wirken sich Veränderungen im Kleber lediglich auf die Vorspannkraft und nicht auf die Lage des optischen Bauelementes aus. Die Anordnung des Klebers mit Abstand zum Strahlengang ermöglicht weiterhin einen effektiven Schutz vor Bestrahlung. Aufgrund der ermittelten vergleichsweise geringen Auswirkung kleiner Abweichungen der Kraftangriffspunkte zu den Koppelstellen wird für den Deckel auf zusätzliche Positionierelemente in der Fassung verzichtet, und die Ausrichtung erfolgt unter visueller Beobachtung bei der Montage.

Mit dem dargestellten Entwurf wurden die in Abschnitt 6.5.2 formulierten Forderungen erfüllt; eine experimentelle Charakterisierung erfolgt im Rahmen des Funktionsnachweises.

6.5.6 Funktionsnachweis

Der Funktionsnachweis richtet sich an der Prozesskette der Herstellung von OHS nach Abbildung 5-1 (siehe Kapitel 5) aus und soll den Nachweis erbringen,

dass die in Abschnitt 5.3 gegebenen OHS-typischen Forderungen im Rahmen der Herstellung zielgerichtet erreicht und unter Betriebsbedingungen sicher gewährleistet werden. Das hierzu verwendete Prüfschema ist in Form einer Übersicht in Abbildung 6-23 gegeben. Die an den einzelnen Prüfpunkten zu messenden Größen sind in Anhang A dargestellt.

Entsprechend des Prüfplans werden Form und Lage der optischen Wirkflächen sowie die Spannungsdoppelbrechung nach verschiedenen Prozessschritten ermittelt, mit dem Ziel, Einflussgrößen bzw. Veränderungen über den Prozess nachzuweisen. Im Rahmen der Charakterisierung finden verschiedene Messmittel und Messalgorithmen Anwendung; auf eine ausführliche Darstellung soll im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden. Eine Darstellung von Messergebnissen ist im Sinne von [Gum08] nur vollständig, wenn sie neben dem Messwert sowohl Messunsicherheit und Einheit enthält. Die Messunsicherheiten der verwendeten Messtechnik beziehen sich auf Herstellerangaben und wurden vorab

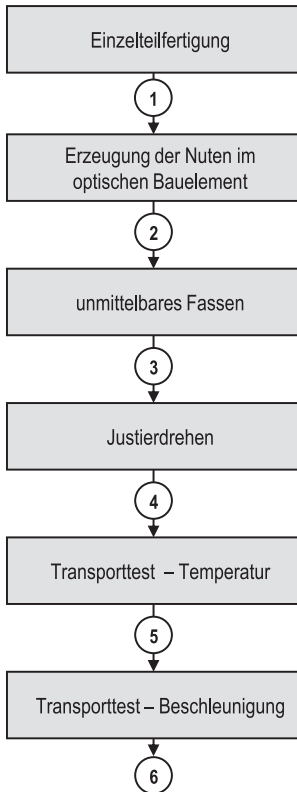


Abbildung 6-23 Prüfschema zur Charakterisierung von gefassten optischen Bauelementen

Tabelle 6-6 Prüfpunkte und zugehörige Prüfkriterien zur Charakterisierung gefasster optischer Bauelemente

	Prüfpunkt laut Versuchsplan					
Prüfkriterium	1	2	3	4	5	6
mechanische Maße (Außendurchmesser, Mittendicke etc.)	x			x		
Passfehler	x	x	x	x	x	x
Spannungsdoppelbrechung	x	x	x	x	x	x
Zentrierzustand			x	x	x	x

im Rahmen von Voruntersuchungen unter den konkreten Messbedingungen überprüft. Der Funktionsnachweis erfolgte an Fassgliedern mit unterschiedlichen optischen Bauelementen.

Im Folgenden sollen Versuchsergebnisse exemplarisch für eine konkav-konvexe Linse aus SiO_2 mit einem Außendurchmesser von 17 mm und einer Mittendicke von 3 mm dargestellt werden, eine Zeichnung ist in Anhang B beigelegt. Dieser Prüfling wurde zur Charakterisierung ausgewählt, da die praktische Erfahrung gezeigt hat, dass er durch seine Geometrie besonders empfindlich auf mechanische Einflüsse beim Fassen reagiert. Der konstruktive Aufbau der untersuchten Fassglieder entspricht Abbildung 6-20. Die Darstellung der Ergebnisse orientiert sich an den Kriterien Spannungsarmut und Lagestabilität.

Zum Nachweis der Spannungsarmut wurden Messungen der Oberflächen-deformation der optischen Wirkflächen (des Passfehlers) und der Spannungsdoppelbrechung der optischen Bauelemente nach verschiedenen Prozessschritten entsprechend Abbildung 6-23 durchgeführt und miteinander verglichen. Abbildung 6-24 zeigt exemplarisch die interferometrische Darstellung der Form der konvexen Linsenfläche an den Prüfpunkten 1, 3 und 6 des Versuchsplans.

In den Abbildungen 6-25, 6-26 und 6-27 ist der Passfehler von drei Versuchsmustern zu den unterschiedlichen Punkten des Versuchsplans dargestellt.

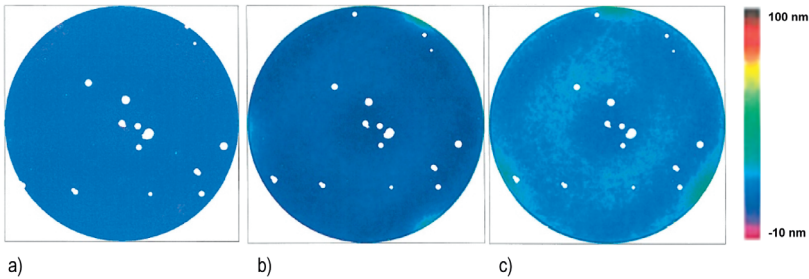


Abbildung 6-24 Versuchsmuster 1, interferometrische Darstellung der optischen Wirkfläche nach verschiedenen Prozessschritten⁸
a) Ausgangszustand b) Optik gefasst c) nach Transporttest – Beschleunigung

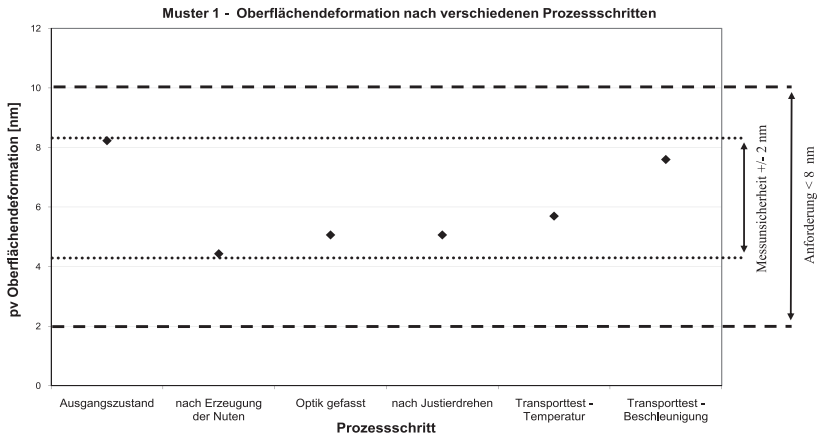


Abbildung 6-25 Muster 1, Passfehler nach verschiedenen Prozessschritten

⁸ Die weißen Punkte in den interferometrischen Darstellungen sind Fehlstellen, die durch das Prüfobjektiv des Interferometers erzeugt und im Rahmen der Auswertung ausgeblendet wurden.

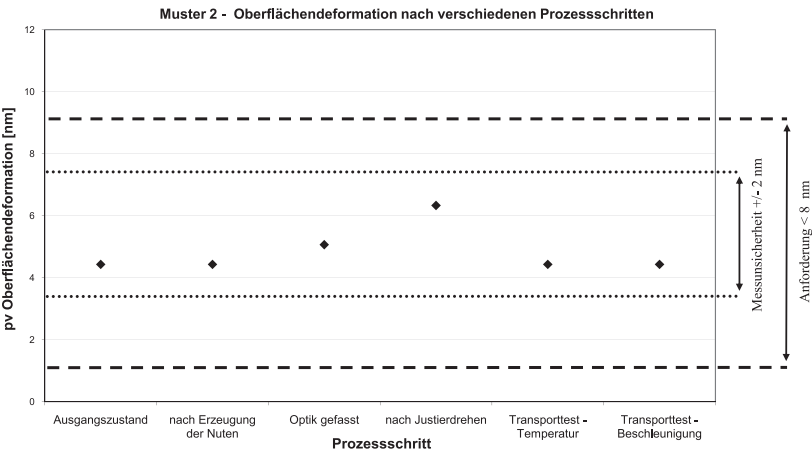


Abbildung 6-26 Muster 2, Passfehler nach verschiedenen Prozessschritten

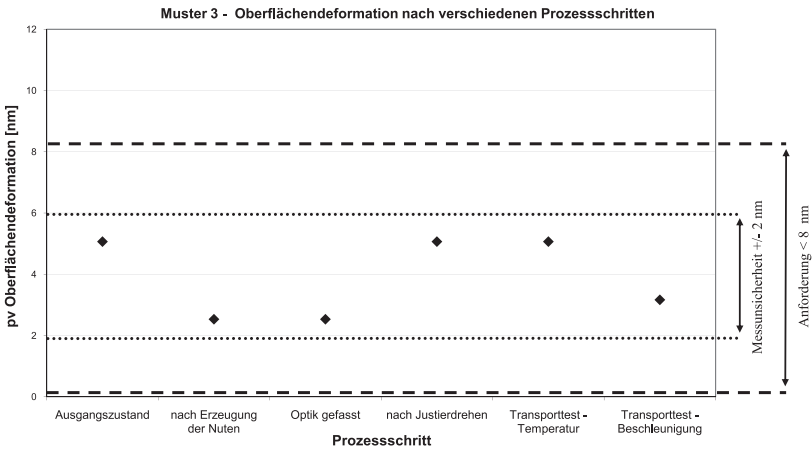


Abbildung 6-27 Muster 3, Passfehler nach verschiedenen Prozessschritten

Es ist ersichtlich, dass die in Kapitel 5.3 dargestellte OHS-typische Anforderung an die Änderung des Passfehlers von $< 8 \text{ nm pv}$ durch das Fassen selbst sicher erreicht und über die nachfolgenden Prozessschritte der Herstellung und Anwendung gehalten werden kann. Darüber hinaus stößt die vorgestellte Anordnung hinsichtlich ihrer Spannungsarmut in einen Bereich vor, der mit der vorhandenen interferometrischen Messtechnik mit einer Messunsicherheit von $< 2 \text{ nm}$ nicht mehr aufgelöst werden kann. Der durch die Messung der Oberflächendeformation erbrachte Nachweis der Spannungsarmut wird durch die Ergebnisse der SDB-Messungen bestätigt. Abbildung 6-28 und Abbildung 6-29 zeigen die Spannungsdoppelbrechung nach den einzelnen Prozessschritten. Die Messunsicherheit für diese Messung wurde mit $\pm 0,1 \text{ nm/cm}$

Muster 1 - Spannungsdoppelbrechung nach verschiedenen Prozessschritten

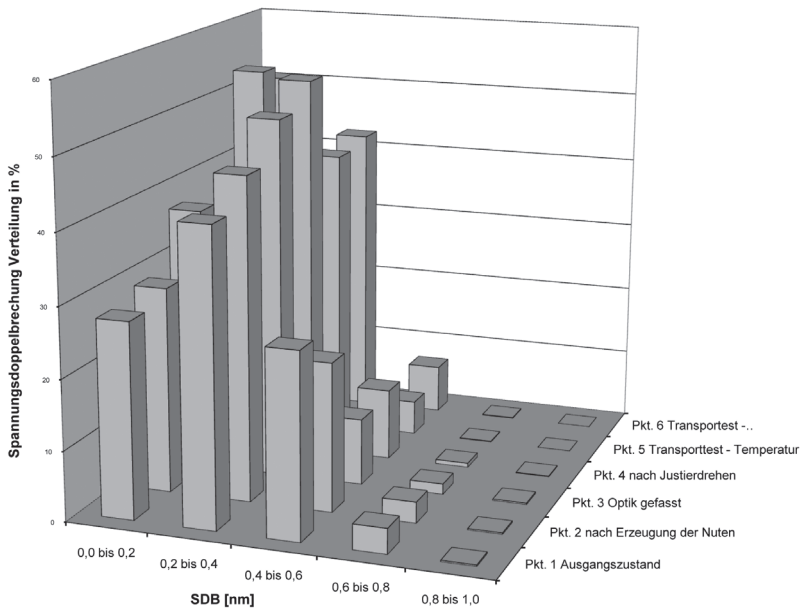


Abbildung 6-28 Versuchsmuster 1, Spannungsdoppelbrechung nach verschiedenen Prozessschritten

optischen Gangunterschied ermittelt. Auch hier konnte die gegebene Anforderung hinsichtlich der Änderung der Spannungsdoppelbrechung durch das Fassen und im Rahmen der Anwendung von $< 1 \text{ nm/cm}$ sicher erfüllt werden.

Ein Nachweis der Lagestabilität erfolgt über die Messung des Zentrierzustandes auf Basis eines geometrisch-optischen Reflexbildverfahrens. Den Bezug für die Messung stellt die Lage des optischen Bauelementes nach dem Justierdrehen (Ausgangszustand) dar. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 6-7 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die Versuchsmuster in ihrer Lagestabilität in einen Bereich vorstoßen, der mit den verfügbaren Messmitteln

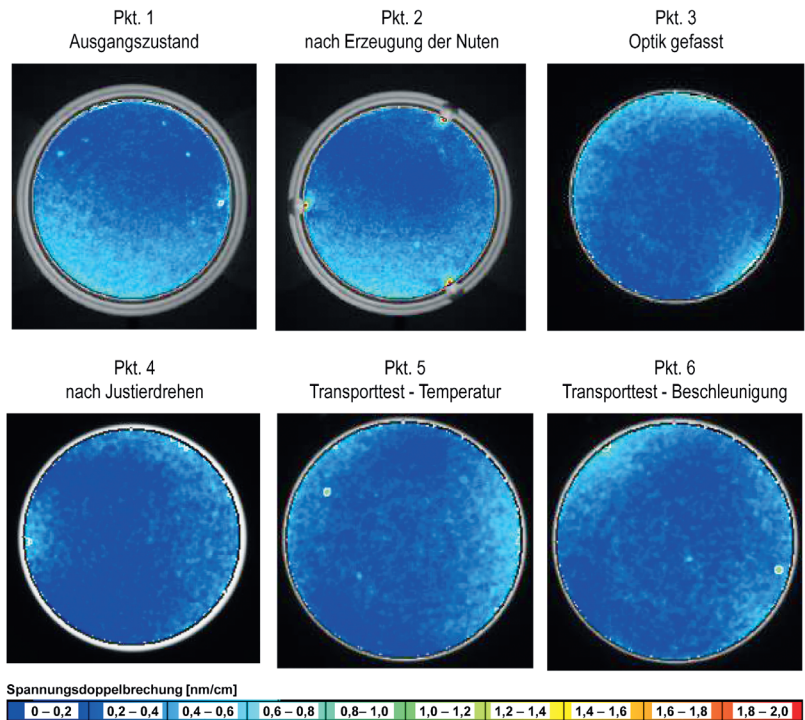


Abbildung 6-29 Versuchsmuster 1, Spannungsdoppelbrechung nach verschiedenen Prozessschritten

Tabelle 6-7 Versuchsmuster 1, Zentrierzustand nach verschiedenen Prozessschritten

	Pkt. 4 nach Justierdrehen	Pkt. 5 Transporttest – Temperatur	Pkt. 6 Transporttest – Beschleunigung	Messunsicherheit
Dezentrierung [μm]	1,1	1,6	2	± 1
Δ Dezentrierung [μm]	–	0,5	0,4	
Kippung [min]	0,07	0,09	0,05	$\pm 0,05$
Δ Kippung [min]	–	0,02	0,04	

nicht mehr aufgelöst werden kann. Es konnte jedoch nachgewiesen werden, dass keine Relativbewegungen größer als die in Kapitel 5.3 vorgestellte Forderungen Δ Dezentrierung $< 2 \mu\text{m}$ und Δ Verkippung $< 0,3$ min stattgefunden haben.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit der konzipierten fassungstechnischen Lösung die in Abschnitt 5.3 dargestellten OHS-typischen Forderungen über den gesamten Versuchsplan sicher erfüllt werden konnten. Hinsichtlich einer vertiefenden Charakterisierung zeigt sich die verfügbare Messtechnik als begrenzender Faktor. Im Vergleich zu bestehenden Lösungen auf Basis von Klebeverbindungen stellen die vorgestellten Ergebnisse eine erhebliche Verbesserung dar. Hierbei muss zwischen Klebeverbindungen auf Basis von Klebern geringer Steifigkeit (weiche Kleber) und Klebern höherer Steifigkeit (harte Kleber) unterschieden werden. Unter dem Gesichtspunkt der Spannungsarmut sind die erreichten Ergebnisse mit den Werten weicher Klebstoffe vergleichbar. Eine eindeutige Verbesserung konnte aufgrund der verfügbaren Messtechnik nicht nachgewiesen werden. Jedoch sind diese weichen Klebstoffe unter den Gesichtspunkten der Lagestabilität und der Langzeitstabilität unter DUV-Strahlung stark limitiert. Unter dem Gesichtspunkt der Lagestabilität sind die erreichten Ergebnisse wiederum vergleichbar mit den Werten harter Klebeverbindungen, eine genauere Differenzierung lässt sich aufgrund der begrenzten Möglichkeiten der Messtechnik nicht treffen. Diese harten Klebstoffe sind aber unter dem Gesichtspunkt der Spannungsarmut nicht für die direkte

Anwendung in OHS geeignet. Eine deutliche Verbesserung des aktuellen Standes der Technik ist hinsichtlich der Langzeitstabilität unter DUV-Strahlung zu verzeichnen, da keine organischen Werkstoffe im Bereich direkter Strahlung oder des Streulichts zum Einsatz kommen. Die für Klebeverbindung bekannten Limitierungen bestehen deshalb nicht.

6.6 Zusammenfassung und Bewertung

Im Rahmen dieses Abschnitts wurde der aktuelle Entwicklungsstand für OHS kleiner Durchmesser dargestellt und hinsichtlich Schwachstellen analysiert; durch methodisches Vorgehen konnte ein Lösungsraum für die Weiterentwicklung fassungstechnischer Lösungen erarbeitet werden. Die Anwendbarkeit dieses Lösungsraumes wurde anschließend exemplarisch anhand der Entwicklung und Charakterisierung eines statisch bestimmten Fassungssystems demonstriert. Die Vorstellung der Ergebnisse des Funktionsnachweises erfolgte exemplarisch an ausgewählten Versuchsmustern.

Im Rahmen des Funktionsnachweises konnten die Spannungsarmut und die Lagestabilität entsprechend der in Kapitel 5.3 formulierten Forderungen erfolgreich nachgewiesen werden. Der Vergleich zu bestehenden Lösungen auf Basis von Klebeverbindungen zeigt eine erhebliche Verbesserung. Als beschränkend im Rahmen des Funktionsnachweises zeigten sich die Nachweisgrenzen der verfügbaren Messtechnik. In besonderem Maße gilt dies für die Charakterisierung hinsichtlich der Lagestabilität, hier war durch das Konzept der Lösung erwartet worden, dass bei Temperaturgang und Schockbelastungen reibungsbehaftete Relativbewegungen zwischen optischem Bauelement und Fassung stattfinden, die nicht vollständig reproduzierbar sind. Diese konnten mit der bestehenden Messtechnik nicht nachgewiesen werden, es bleibt dennoch davon auszugehen, dass dieser Effekt vorhanden ist und sich bei zukünftig steigenden Anforderungen mit Lagestabilitäten im nm-Bereich als limitierend herausstellt. Als weiterer einschränkender Faktor für die dargestellte Fassungstechnik muss ihre Anwendbarkeit hinsichtlich bestimmter Geometrien des optischen Bauelementes genannt werden. Bei Linsen bikonvexer Form und nahezu randscharfer

Gestaltung verbleibt kein ausreichender Bauraum für das Anbringen von Nuten. Für diese Gruppe der optischen Bauelemente besteht dementsprechend Handlungsbedarf bei der Entwicklung geeigneter Fassungstechniken; der vorgestellte Lösungsraum kann als Ausgangspunkt für diese Entwicklung dienen.

Als nächste Schritte bei der Weiterentwicklung fassungstechnischer Lösungen sind zum einen Einsatz und Charakterisierung der vorgestellten Lösung in einem vollständigen System und in einem Serienprozess zu sehen und zum anderen die Anwendung des vorgestellten Lösungsraumes auf die Entwicklung neuer und die Verbesserung bestehender Fassungstechnologien. Dabei bietet der vorgestellte Lösungsraum sowohl Potenzial für die Entwicklung von Fassungstechniken für OHS auf Basis von Löt- und Klebeverbindungen entsprechend Abschnitt 6.4 als auch für die Anwendung auf fassungstechnische Lösungen außerhalb der Klasse der optischen Hochleistungssysteme.

Unter konstruktionsmethodischen Gesichtspunkten konnte mit dem vorgestellten Vorgehen und dem hierzu entwickelten Lösungsraum ein Weg aufgezeigt werden, die aktuell stark intuitiv betonte und von umfangreichen Erfahrungswerten des verantwortlichen Konstrukteurs abhängige Vorgehensweise bei der Entwicklung fassungstechnischer Lösungen durch systematische Herangehensweisen zu erweitern.

7 Mittelbare Fassungstechnik

7.1 Einführung

Das unter dem Oberbegriff Systemmontagetechnik betrachtete mittelbare Fassen hat die Aufgabe, die in Fassgliedern unmittelbar gefassten optischen Bauelemente zu einem mehrgliedrigen optischen System, beispielsweise einem Objektiv, zu verbinden. In diesem Rahmen ist es notwendig, die exakte Lage der optischen Bauelemente zueinander zu gewährleisten und Rückwirkungen von Systemmontage und Störgrößen auf die optischen Bauelemente zu begrenzen, das heißt, die Spannungsarmut der unmittelbaren Fassungstechnik zu unterstützen. Die Lage der optischen Bauelemente wird bestimmt durch:

- die **laterale Lagezuordnung (Zentrierung)**⁹ der optischen Achsen der einzelnen optischen Bauelemente zueinander oder zu einer gegebenen Achse des optischen Systems,
- die **axiale Lage** der optischen Bauelemente zueinander (**Luftabstand**)¹⁰ bzw. zu einer axialen Schnittstelle des Systems und
- die Zuordnung einer im Rahmen einer Passfehlervariationsrechnung [Guye88] ermittelten **Drehlage** der gefassten optischen Bauelemente zueinander bzw. zu einer Schnittstelle des Systems.

[Fran08] stellt dar, in welcher Weise sich die Zentrierung eines optischen Bauelementes, repräsentiert durch seine optische Achse, aus einer Verkipfung und

9 [DIN3140] Unter lateraler Lageabweichung ist der Versatz und/oder die Verkipfung der Achsen von Teilsystemen oder Einzelteilen gegen die Achse des Gesamtsystems zu verstehen.

10 Der Luftabstand ist der axiale Abstand zweier benachbarter Linsenscheitel.

einer Verschiebung zusammensetzen kann. Zum besseren Verständnis der in den nachfolgenden Abschnitten dargestellten Zusammenhänge wird im weiteren Verlauf der Arbeit für die Beschreibung des Anteils an der Lage der optischen Achse, der sich durch Schiebung senkrecht zur optischen Achse ergibt, von **radialer Lagezuordnung** gesprochen. Der Anteil der Lage der optischen Achse, der durch Verkippung der optischen Achse entsteht, wird als **Zuordnung der Kippage** bezeichnet.

Die Systemmontagetechnik ist ähnlich der Fassungstechnik eine Verbindungsaufgabe, die sich mit der Gestaltung einer Verbindung mit spezifischen Eigenschaften beschäftigt. Entsprechend der in Kapitel 4 durchgeführten Betrachtungen kann man beim Aufbau mechanischer Verbindungen zwischen Verbindungsbestandteilen mit lagedefinierenden und solchen mit lagesicherndem Charakter unterscheiden. Unter Verwendung dieser Unterscheidung wird die Genauigkeit der oben dargestellten Lagezuordnung zwischen den gefassten optischen Bauelementen bestimmt durch:

- die Genauigkeit, mit der die lagedefinierenden Verbindungsbestandteile (die Koppelstellen) ausgeführt werden können und
- die Genauigkeit, mit der eine Lagezuordnung durch Justierung erfolgen kann.

Unter Betrachtung der dargestellten Gesichtspunkte soll nach einer Analyse des Standes der Technik der Lösungsraum für die Realisierung dieser Verbindungsaufgabe untersucht werden.

7.2 Stand der Technik

In der Praxis wird bei den Montagetechnologien häufig zwischen makrooptischer und mikrooptischer Montage unterschieden [Blie08]. Die zu betrachtenden OHS kleiner Durchmesser zählen zur Gruppe der Makrooptik und werden aktuell im Wesentlichen nach dem Füllfassungsprinzip aufgebaut [Fran08]. Der Aufbau als Füllfassung ist dadurch charakterisiert, dass die einzelnen Fassglie-

der nacheinander in einen Innenzylinder gefüllt und axial mit einem Verschluss gesichert werden [Thes03]. Durch den Verschluss wird eine Vorspannkraft aufgebracht und nicht durch Koppelstellen definierte Freiheiten werden durch Kraftschluss gesichert. Durch diesen Aufbau gibt der Füllzylinder in einem durch das Fügspiel begrenzten Rahmen die radiale Lage der Fassglieder vor. Eine axiale Lagezuordnung ist unmittelbar durch die Fassungen selbst, über Abstimmringe oder geeignete Anlageflächen im Füllzylinder gegeben. Abbildung 7-1 stellt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Systems dar, eine Analyse dieser Verbindung soll im Folgenden entsprechend der in Abschnitt 6 vorgestellten Vorgehensweise durchgeführt werden.

Die Kombination der Koppelstellen zwischen Fassglied und Füllzylinder ergibt eine mehrfach überbestimmte Anordnung. Um mit dieser Anordnung zu einer funktionsfähigen Lösung zu gelangen, muss entweder das Fügspiel ausreichend groß oder der zentrierend wirkende Durchmesser am Fassglied (Höhe a in Abbildung 7-1) möglichst kurz oder ballig ausgeführt werden. Bei einem sehr kurzen oder ballig ausgeführten Zentrierbund besteht an den Fassgliedern ein sehr ungünstiges Verhältnis zwischen Führungsdurchmesser und Führungslän-

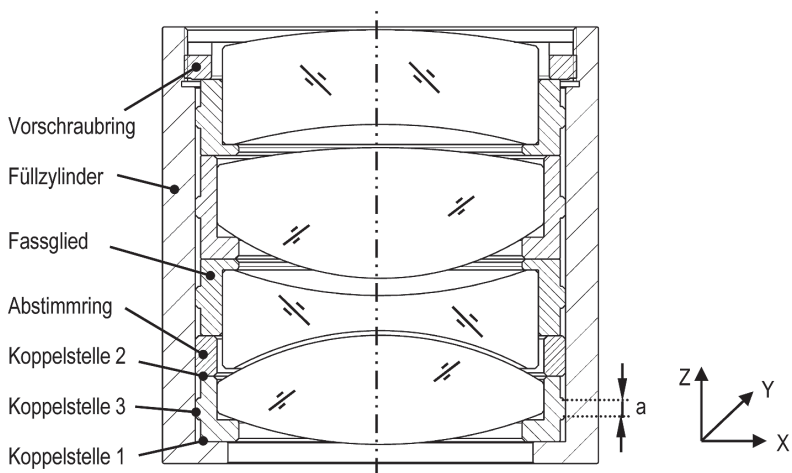
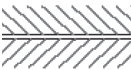
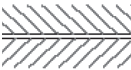
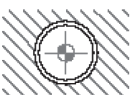


Abbildung 7-1 Füllfassung, schematischer Aufbau

Tabelle 7-1 Füllfassungsprinzip, Analyse der Koppelstellen

Analyse der Koppelstellen							
Kombination von Wirkflächen	grafische Darstellung	gesperzte Freiheiten					
		Translation in			Rotation um		
		X	Y	Z	X	Y	Z
Koppelstelle 1 Wirkflächen: Ebene – Ebene (untere axiale Anlagefläche)				x	x	x	
Koppelstelle 2 Wirkflächen: Ebene – Ebene (obere axiale Anlagefläche)				x	x	x	
Koppelstelle 3 Zylinder – Zylinder (Randzylinder Fassglied – Bohrung d. Füllzylinders) mit Fügspiel		x	x		x	x	

ge, sodass diese Anordnungen für das Befüllen des Füllzylinders sehr kritisch sind. Eine Montage ist nur mithilfe spezieller Füllvorrichtungen möglich. In [Ebe88] ist eine Übersicht des Fügspiels in Abhängigkeit von der Werkstoffpaarung und dem Fügedurchmesser gegeben. In der Praxis erreichbar sind $4\text{ }\mu\text{m}$ Fügspiel [Fran08]. Hinzu kommt, dass bei der Fertigung dieses engen Fügspiels eine aufwendige Prozessführung mit höchsten Anforderungen hinsichtlich der mechanischen Toleranzen erforderlich ist. Das Fügspiel ist somit durch hohen technischen Aufwand zu minimieren, jedoch nicht gänzlich zu vermeiden.

Aus der Betrachtung der Koppelstellen ergibt sich entsprechend Gl. 4-1 eine fünffache Überbestimmtheit der Anordnung dadurch, dass die vorhandenen Koppelstellen zehn Freiheiten sperren und die Freiheit Rotation um z durch diese nicht definiert wird. Bei Betrachtung der Überbestimmtheit an nur einem Fassglied sind zwei Szenarien denkbar: Die Lauffehler zwischen axialer und radialer Schnittstelle sind so gering, dass sie vom Fügspiel im Füllzylinder kompensiert werden und nur die axiale Schnittstelle entfaltet ihre Wirkung –

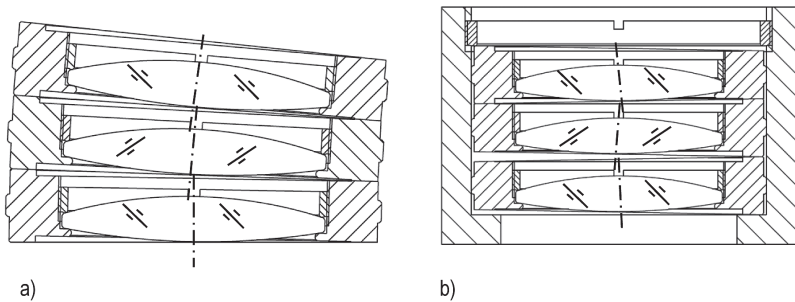


Abbildung 7-2 Überlagerung der Fehler axialer Schnittstellen in mehrgliedrigen optischen Systemen a) allgemein beim Stapeln b) Füllfasungsprinzip

dies wird im Normalfall so sein. Sind hingegen die Lauffehler zwischen radialer und axialer Schnittstelle größer als das Fügenspiel, kommen beide Schnittstellen in Eingriff und werden gegeneinander verspannt, was zu Zwangskräften führt. Für die Betrachtung von mehreren Fassgliedern gilt oben Dargestelltes ebenfalls, jedoch kommt es durch das Aufeinanderstapeln der einzelnen Fassglieder zu einer Aufsummierung der Fehler der axialen Schnittstellen der Fassglieder entsprechend Abbildung 7-2.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass die Überbestimmtheit in den mechanischen Koppelstellen in Kombination mit der Problematik des Verkantens und Verklemmens beim Befüllen zu erheblichen Zwangskräften auf das Fassglied führt. Da die Fassglieder in OHS kleiner Durchmesser in der Regel sehr filigran aufgebaut sind, wirken diese Zwangskräfte auch auf die Verbindung von optischem Bauelement zu Fassung und können diese schädigen oder sie können auf das optische Bauelement übertragen werden. Dies erklärt auch den in der Praxis bekannten Sachverhalt, dass bei OHS der Komponentenaufbau nur mit minimalen Vorspannkraften gesichert werden kann und bei Erhöhung der Vorspannkraft eine Verschlechterung der Abbildungsleistung zu beobachten ist.

Bei Betrachtung des Zentrierzustandes wurde im vorhergehenden Abschnitt zwischen der radialen Lagezuordnung und der Zuordnung der Kippage diffe-

renziert. Die erreichbare Genauigkeit der radialen Lagezuordnung wird durch das Fügenspiel zwischen Fassglied und Füllzylinder bestimmt. Grundsätzlich können sich die einzelnen Fassglieder im Rahmen des Fügspiels relativ zueinander bewegen, ihre Relativlage ist nicht eindeutig bestimmt, sondern wird nur durch Kraftschluss gesichert. Zur Erhöhung der erreichbaren Genauigkeit sind Ausführungen bekannt, in welchen das Fügenspiel durch Verwendung einer seitlichen Andruckschiene [Hage83] oder eines elastisch aufgebauten Fassgliedes [FLHH96] eliminiert wird. Mit diesen Anordnungen sind höhere Genauigkeiten zu erwarten. Jedoch wird die ohnehin vorhandene Überbestimmtheit durch weitere Koppelstellen noch vergrößert. Die erreichbare Genauigkeit der Kipp-lage wird zum einen durch die Genauigkeit der axialen Fügeflächen am Fassglied und zum anderen durch die Montage bestimmt. Durch das Verkanten und Verklemmen im Rahmen der Montage entsteht, wie in Abbildung 7-2 b) dargestellt, ein undefinierter Zustand, der sich genauigkeitsbegrenzend auswirkt.

Als Ergebnis der durchgeführten Betrachtung lässt sich konstatieren, dass optische Systeme nach dem vorgestellten Füllfassungsprinzip sowohl hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeiten der Lagezuordnung als auch hinsichtlich ihrer Spannungsarmut beim Einsatz in OHS an ihre Grenzen stoßen. Die Ursache für die begrenzte Genauigkeit der Lagezuordnung findet sich im notwendigen Fügenspiel zum Befüllen des Füllzylinders und in der durch Verklemmen nur begrenzt definierten Kipp-lage. Auf die Spannungsarmut der Anordnung wirken sich Zwangskräfte durch die Überbestimmtheit der Koppelstellenkombination und undefiniert wirkende Kräfte im Rahmen des Befüllens limitierend aus. Beide genannten Punkte führen dazu, dass, abhängig von der geforderten Leistungsfähigkeit, OHS kleiner Durchmesser mit dem als Füllfassungsprinzip bezeichneten konstruktiven Aufbau nicht mehr prozesssicher hergestellt werden können.

Ein wesentlicher Vorteil beim Aufbau von OHS nach dem Füllfassungsprinzip liegt im einfachen Aufbau der Anordnung, mit der die Drehlage zwischen den einzelnen Fassgliedern frei einstellbar ist.

7.3 Anforderungen

In den vergangenen Jahren sind erhebliche technologische Anstrengungen unternommen worden, um die Genauigkeit der mechanischen Koppelstellen von Fassgliedern und die Lagezuordnung im Rahmen der Systemmontage zu steigern; [Fran08], [Sure06], [Höfe08], [Kehr10] belegen dies. Die erreichten Fortschritte für OHS kleiner Durchmesser können jedoch bei einem Komponentenaufbau nach dem Füllfassungsprinzip aufgrund der dargestellten Schwachstellen nur bedingt genutzt werden.

Für die konstruktive Gestaltung des Komponentenaufbaus ergibt sich damit das Ziel, die im Stand der Technik ermittelten Schwachstellen durch konstruktive Maßnahmen zu beseitigen und die Möglichkeiten bestehender Fertigungstechnologien hinsichtlich erreichbarer Zentriergenauigkeiten nutzbar zu machen. Als konkrete Forderungen sind dabei zu benennen:

- Spannungsarmut des Komponentenaufbaus durch Vermeidung oder Beherrschung von Überbestimmtheiten,
- Erhöhung der im Rahmen der Komponentenmontage erreichbaren Genauigkeit der Lagezuordnung.

7.4 Lösungsraum

Grundsätzlich kann der Lösungsraum zur Gestaltung mechanischer Verbindungen entsprechend Kapitel 6.4 auch in diesem Abschnitt Anwendung finden. Ergänzend hierzu soll im Folgenden ein Lösungsfeld unter dem Blickwinkel der Lagezuordnung zwischen Fassgliedern und Gesamtsystem dargestellt werden.

Um einzelne Fassglieder hochgenau zueinander bzw. zu Bezugselementen eines optischen Systems anordnen zu können, müssen diese über mechanische Koppelstellen, das heißt durch die Genauigkeit der mechanischen Wirkflächen oder justierbar/messend zueinander in Bezug gesetzt werden. Die Lagezuordnung zwischen den einzelnen Fassgliedern kann dementsprechend unmittelbar, mittelbar, justierbar oder als Kombination dieser drei Eigenschaften gestaltet

sein. Die Anordnung der Koppelstellen zum Aufbau der mechanischen Verbindung kann bezüglich des Fassgliedes radial, axial oder als Kombination dieser erfolgen. Die dargestellten Eigenschaften können als charakteristische Eigenschaften zur allgemeinen Beschreibung der gegebenen Verbindungsaufgabe genutzt werden. Durch systematische Variation und Kombination dieser

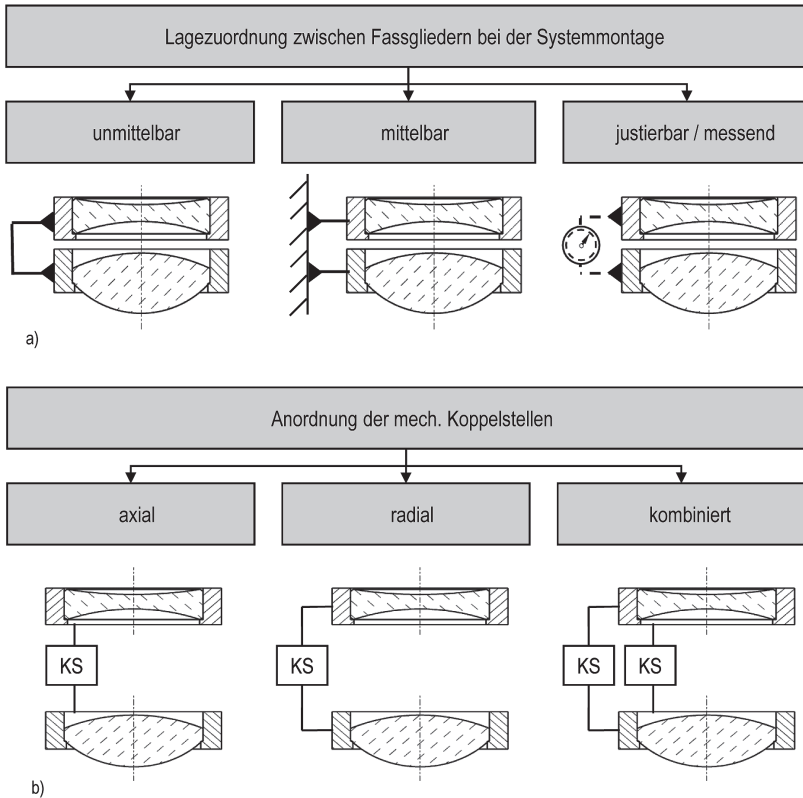


Abbildung 7-3 Elemente zur systematischen Erarbeitung eines Lösungsraumes für die Montage mehrgliedriger optischer Systeme
a) Lagezuordnung zwischen den Fassgliedern b) Anordnung mechanischer Koppelstellen

Eigenschaften lässt sich der Lösungsraum für die Systemmontage vollständig beschreiben. Eine Darstellung ist in Abbildung 7-3 gegeben, als Bezugselemente für die Lagezuordnung können hierbei sowohl mechanische Flächen (Referenzflächen am Fassglied) als auch die optischen Referenzelemente (z. B. die optische Achse der gefassten optischen Bauelemente) genutzt werden.

Die sich entsprechend des Lösungsraumes ergebenden Lösungen sind unter den Gesichtspunkten der konstruktiven Umsetzung und der technologischen Realisierung anwendungsspezifisch zu bewerten. Diese Aufgabe ist im Rahmen dieser Arbeit aufgrund ihres Umfangs nicht abzubilden und stellt einen eigenständigen Themenkomplex bei der Weiterentwicklung der Systemmontage von OHS dar. Zur Weiterentwicklung des Standes der Technik soll sich im Rahmen dieser Arbeit darauf beschränkt werden, das in OHS großer Durchmesser Anwendung findende Stapelfassungsprinzip hinsichtlich seiner Einsetzbarkeit für OHS kleiner Durchmesser zu untersuchen.

7.5 Stapelfassung

7.5.1 Einführung

Der Komponentenaufbau nach dem Prinzip der **Stapelfassung** ist dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Fassglieder ohne radiale mechanische Lagezuordnung zu einem System montiert werden. Der mechanische Kontakt zwischen den einzelnen Fassgliedern erfolgt ausschließlich über die axialen Fügeflächen der Fassglieder. Durch Wegfall des Füllzylinders verbleiben zwei Freiheiten der Translation senkrecht zur optischen Achse. Diese Freiheiten werden im Rahmen der Systemmontage zur Justierung der lateralen Lagezuordnung genutzt und bieten damit die Möglichkeit, Fehler durch vorgelagerte Prozessschritte teilweise zu kompensieren. Hierbei kann aber lediglich der Zentrierfehler durch Parallelversatz positiv beeinflusst werden. Der Zentrierfehler durch Kippung wird durch die axialen Anlageflächen bestimmt und kann auf diese Weise nicht beeinflusst werden. Neben der Kippage bestimmen die axialen Anlageflächen über die Scheitelhöhen die Luftabstände zwischen den optischen Bauelementen.

Bei hohen Ansprüchen an die Genauigkeit der Luftabstände oder zur Justage dieser im Rahmen der Systemoptimierung ist die Verwendung von zusätzlichen Abstimmringen üblich, die nach [Fran08] mit einer Toleranz von $\pm 1 \mu\text{m}$ Dicke hergestellt werden können. Die Montage nach dem Stapelprinzip erfolgt schrittweise an speziellen Arbeitsplätzen. Eine Sicherung des Komponentenaufbaus kann direkt zwischen zwei jeweils benachbarten Fassgliedern, in Gruppen oder als gesamtes System erfolgen. Eine Darstellung findet sich in Abbildung 7-4.

Eine direkte Übertragung der aus dem Bereich der OHS großer Durchmesser, insbesondere der Halbleitertechnik, bekannten konstruktiven Lösungen auf OHS kleiner Durchmesser ist wegen der unterschiedlichen Größen- und Gewichtsverhältnisse nicht möglich. Des Weiteren ist die Forderung der freien Einstellbarkeit der Drehlage im Rahmen einer Passfehlervariationsrechnung bei Lithografie-Objektiven nicht üblich. Hier ist im Rahmen des Taktes der Schnittstelle zwischen den Fassgliedern lediglich eine Einstellung der Drehlage in diskreten Schritten realisierbar. Bei der Montage von Lithografie-Objektiven werden die einzelnen Fassglieder mithilfe taktiler Messverfahren nach einer radialen mechanischen Referenzfläche der Fassung justiert.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass zusätzliche Bewegungsfreiheiten die Möglichkeit einer Erhöhung der Zentriergenauigkeit bieten. Sofern die einzelnen Fassglieder nicht durchgehend verschraubt sind (vgl.

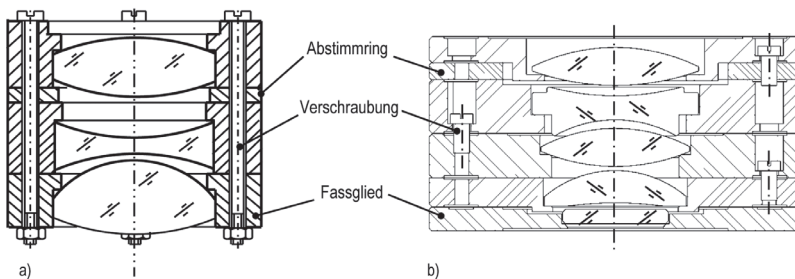


Abbildung 7-4 Schematischer Aufbau nach dem Stapelfassungsprinzip
a) mit durchgehender Verschraubung [Fran08] b) bei direkter Verschraubung

Abbildung 7-4), kann das System zum Zwecke der Systemoptimierung an beliebiger Stelle getrennt werden. Dies ist besonders bei den Ausführungen von OHS von Vorteil, bei denen die Systemoptimierung durch einen iterativen Prozess erfolgt und bei denen die sonst übliche Anwendung des Füllfassungsprinzips eine Demontage des kompletten Systems erforderlich macht. Durch die dargestellten Eigenschaften bietet das Stapelfassungsprinzip für den Einsatz in OHS grundsätzlich Vorteile gegenüber dem bisher vorwiegend eingesetzten Füllfassungsprinzip. In welchem Umfang die geschilderten Vorteile in OHS kleiner Durchmesser wirksam werden, soll im Weiteren durch technologische und konstruktive Betrachtungen geklärt werden.

7.5.2 Technologische Untersuchungen

Im Rahmen einer technologischen Untersuchung sollen die erreichbaren Justiergenauigkeiten für die Justierung der lateralen Lage abgeschätzt werden. Jede Justierung lässt sich nach [Hans67] durch einen entsprechenden Justierkreis beschreiben, für die gegebene Anwendung gilt allgemein ein **Justierkreis** entsprechend Abbildung 7-5.

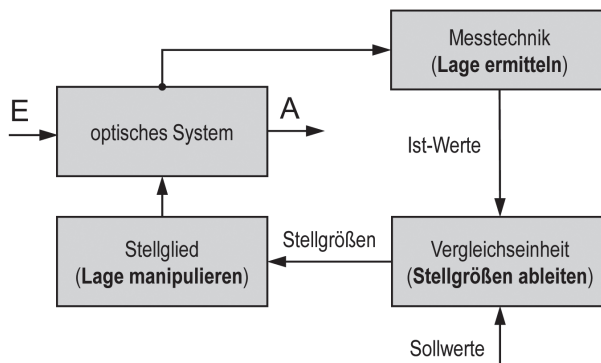


Abbildung 7-5 Allgemeiner Justierkreis für die Justierung eines optischen Systems

Aus diesem Justierkreis leiten sich für die Durchführung der Justierung folgende Grundoperationen ab:

- **Lage** des Fassgliedes **ermitteln**,
- Soll/-Istwert-Vergleich und **Stellgrößen ableiten** sowie
- radiale **Lage** des Fassgliedes **manipulieren**

Hierzu sollen im Folgenden die Grundoperationen Lage ermitteln und Lage manipulieren untersucht werden. Für die Grundoperation Stellgrößen ableiten wird auf die Ausführungen in [Fran08] verwiesen, wo eine Stellgrößenermittlung durch erweiterte Vergleichsgrößenberechnung vorgestellt wird, welche auch für die Justierung mehrgliedriger optischer Systeme geeignet ist.

Lage des Fassgliedes ermitteln

Eine Übersicht möglicher Verfahren zur Ermittlung der Lage der optischen Achse von optischen Bauelementen ist ebenfalls in [Fran08] gegeben und wird im Folgenden vorgestellt.

Bei der Messung mittels **Zentrierfühlhebel** wird die optische Fläche taktil angetastet und bei Rotation um eine Bezugsachse der Axialschlag ermittelt. Dieser erlaubt einen eindeutigen Rückschluss auf die Zentrierung der optischen Fläche.

Zur Messung nach dem geometrisch-optischen **Reflexbildverfahren** wird eine Testmarke auf die zu vermessende Prüflingsfläche abgebildet und von dieser reflektiert. Die reflektierte Testmarke kann nun mithilfe eines geeigneten Systems beobachtet werden. Die Bewegung der reflektierten Testmarke bei Rotation des Prüflings lässt eine eindeutige Aussage über die Lage der Krümmungsmittelpunkte der betrachteten optischen Fläche zur Drehachse zu. Durch Ermittlung der Krümmungsmittelpunkte von zwei optischen Wirkflächen bzw. die Ermittlung von einem Krümmungsmittelpunkt und der Verkipfung einer Planfläche (bei plan-konkaven oder plan-konvexen Linsen) lässt sich wiederum die radiale Lagezuordnung und die Kipplage des optischen Bauelements ermitteln.

Im **Durchlichtverfahren** wird eine Referenzmarke durch den Prüfling abgebildet und deren Bildlage bei Rotation des Prüflings um eine Bezugsachse

Tabelle 7-2 Übersicht – Verfahren zur Zentriermessung

Verfahren	Zentrier- fühlhebel	geometrisch- optische Reflexbild- verfahren	Durchlicht- verfahren	Interferome- trische Zen- triermessung	Zentriermes- sung durch Wellenfront- auswertung
Messprinzip	taktil	Reflexion	Durchlicht	Reflexion/ Durchlicht	Reflexion/ Durchlicht
Messung von Einzelflächen	nein	ja	nein	ja	ja
Messung von innenliegen- den Flächen	nein	ja	nein	ja	ja
kommerzielle Verfügbar- keit	ja	ja	ja	nein	nein
erreichbare Genauigkeit	> 1 μm	< 0,1 μm	> 0,5 μm	< 0,05 μm	> 0,05 μm

beobachtet. Durch das Abbilden im Durchlicht kann nur die optische Gesamtwirkung eines Prüflings ermittelt werden.

Die **interferometrische Zentriermessung** basiert auf der messtechnischen Erfassung einer durch den Prüfling deformierten Wellenfront. Bei Überlagerung dieser Wellenfront mit einer idealen Referenzwelle kommt es bei kohärenter Lichtquelle zu Interferenz zwischen beiden Wellen. Aus den Messdaten der Interferenz ist ein Rückschluss auf die Lage der Prüffläche möglich.

Bei Zentriermessung durch **Wellenfrontauswertung nach Hartmann Schack** wird ähnlich der interferometrischen Messung die durch den Prüfling deformierte Wellenfront gemessen. Die Messung der Wellenfront erfolgt im Gegensatz zu den interferometrischen Verfahren auf Basis einer Intensitätsmessung. Aus dieser lässt sich die Wellenfront rekonstruieren, welche wiederum eindeutig Aufschluss über die Lage des Prüflings liefert.

Die gegebenen Verfahren ergänzt um spezifische Verfahrensmerkmale nach [Trio09], [Demu91] sind in Tabelle 7-2 gegenübergestellt.

Von den dargestellten Verfahren ist für den gegebenen Anwendungsfall das geometrisch optische Reflexbildverfahren, die interferometrische Zentriermessung und die Zentriermessung durch Wellenfrontauswertung in Reflexion einsetzbar, da nur diese auch zur Messung innen liegender Flächen geeignet sind und zudem über eine ausreichende Genauigkeit verfügen. Aufgrund der kommerziellen Verfügbarkeit ist die Nutzung eines klassischen geometrisch-optischen Reflexbildverfahrens sinnvoll.

Lage des Fassgliedes manipulieren

Die Manipulation der radialen Lagezuordnung stellt konstruktiv betrachtet die Realisierung einer Bewegung mit einer definierten Auflösung dar. Zur Erzeugung von Bewegungen in technischen Systemen sind in der Regel die zwei Funktionselemente Aktor und Führung erforderlich, diese bilden eine kinematische Kette. Für die Realisierung einer bestimmten Auflösung muss diese deshalb sowohl vom Aktor eingepreßt als auch von der Führung übertragen

werden können. Nach [Sieb00] werden Bewegungen, die der Justierung und Positionierung von Bauelementen in der Feinmechanik/Optik dienen, durch kontinuierlich Antriebe oder Stoßantriebe realisiert.

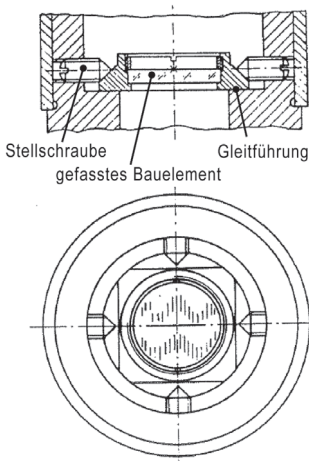


Abbildung 7-6 Justierung eines
Fadenkreuzes
[Thes03]

In **kontinuierlich arbeitenden Antrieben** erfolgt die Erzeugung linearer Verstellungen dabei häufig aus einer Rotationsbewegung heraus. Zur Erzeugung einer entsprechenden Auflösung finden mechanische Zwischenelemente Anwendung, beispielsweise Zahnrad- oder Schraubengetriebe, Hebel und Ähnliches. Eine exemplarische Anordnung ist in Abbildung 7-6 dargestellt. Die Vorteile kontinuierlich arbeitender Systeme liegen in der Verfügbarkeit

einer breiten Anzahl von Antriebslösungen. Für die hochgenaue Manipulation der Lage optischer Bauelemente im Rahmen der Justierung optischer Systeme finden vorwiegend manuell betätigte Stellschrauben in Kombination mit Gleit- und Federführungen Anwendung.

In Anordnungen mit Gleitführungen wird die erreichbare Auflösung durch **Stick-Slip-Effekte**¹¹ in den Gleitführungen limitiert, minimale Schrittweiten in der Größenordnung von 5 μm können erreicht werden. Durch mehrmaliges Anfahren einer definierten Position unter direkter Beobachtung sind mit solchen Anordnungen in einem – jedoch nicht mehr zielgerichteten – Prozess Positionierungen bezüglich einer bestimmten Referenz bis zu einer Genauigkeit von ca. 2 μm möglich. In Systemen mit Federführungen wird die erreichbare Auflösung der Positionierung im Wesentlichen durch die Auflösung des Antriebes bestimmt. Schrittweiten im nm-Bereich sind Stand der Technik. Eine Darstellung eines Objektivs in Stapelfassung mit Justiermöglichkeit auf Basis von Federführungen findet sich in [Blie08]. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass kontinuierlich arbeitende Antriebe nur in Kombination mit Zwischengetrieben und Federführungen geeignet sind, um die geforderten Auflösungen zur Justierung in OHS sicher zu erfüllen. Diese Konstruktionselemente sind in ihrer technischen Realisierung vergleichsweise aufwendig und können in der Regel nur für die Gestaltung spezieller Justierstellen – exemplarisch dargestellt in [Blie08], [Schl08], [WeHo06], [SMT08] – dienen. Für die Justierung der Lagezuordnung zwischen sämtlichen Fassgliedern eines optischen Systems können sie in OHS kleiner Durchmesser, bedingt durch den verfügbaren Bauraum, nicht angewandt werden.

Bei der Nutzung von **Stoßantrieben** erfolgt die Lagemanipulation durch Einprägung von mechanischen Impulsen. Mit einem massebehafteten Stößel wird in Bewegungsrichtung auf das zu stellende Bauteil gestoßen. Dabei wird ein Teil der kinetischen Energie des Stößels auf das Bauteil übertragen und es findet

11 Unter dem Stick-Slip-Effekt versteht man den Übergang von Haft- zu Gleitreibung bei einem Bewegungsvorgang. Infolge des Stick-Slip-Effektes kommt es bei kleinen Gleitgeschwindigkeiten aufgrund von Mischreibung (Haft- und Gleitreibung) zu ungleichförmigen Bewegungen.

eine Relativbewegung statt. Aufgrund des sonst störenden Stick-Slip-Effektes sind bei diesem Verfahren mit Gleitführungen Schrittweiten im nm-Bereich möglich. Eine Darstellung des Funktionsprinzips findet sich in Abbildung 7-7. Im Rahmen dieser Arbeit soll die Nutzung von Stoßantrieben zur Lagemanipulation im Rahmen von Justierprozessen als **Impulsjustierung** bezeichnet werden. Die Lagemanipulation durch Einleitung von Impulsen ist in der optischen Industrie seit jeher üblich; in den vergangenen Jahren wurden erfolgreiche Anstrengungen unternommen, diese zu automatisieren oder in automatisierte Justageprozesse einzubinden [Sieb04], [Sieb00], [PSGGS01], [Fran08]. Für die durchgängige Anwendung beim Aufbau eines aus mehreren Fassgliedern bestehenden optischen Systems bietet die Nutzung von Stoßantrieben in Kombination mit Gleitführungen die wesentlichen Vorteile, dass am Fassglied keine zusätzlichen Elemente zur Erzeugung und Einkopplung der Antriebsenergie notwendig sind und dass die axialen Fügeflächen der Fassglieder direkt als Gleitführungen genutzt werden können. Die Anwendung der Impulsjustierung für die hochgenaue Lagemanipulation in OHS großer Durchmesser ist Stand der Technik, eine Betrachtung der Anwendbarkeit für die hochgenaue Justierung in OHS kleiner Durchmesser soll an dieser Stelle durchgeführt werden.

Die funktionellen Anforderungen an eine Impulsjustierung zur Lagemanipulation von Fassgliedern im Rahmen der Systemmontage von OHS sind im Wesentlichen durch die notwendige Auflösung und das variable Eigengewicht über ein definiertes Prüflingsspektrum¹² bestimmt. Hierzu werden im Rahmen dieser Betrachtung die folgenden Forderungen festgelegt:

- Impulsschrittweite $\Delta s \leq 0,250 \mu\text{m}$,
- Prüflingsmasse m_2 50 g bis 1000 g (bei einem Durchmesser der Fassglieder von 20 mm bis 160 mm – vgl. Kapitel 3.2).

Eine umfassende theoretische Darstellung zur Stoßjustierung ist in [Sieb00] gegeben. Hier werden drei Modelle zur Beschreibung vorgestellt:

12 Das zu justierende Element, z. B. ein Fassglied, wird im Rahmen der Betrachtung der Justierung allgemein als Prüfling bezeichnet.

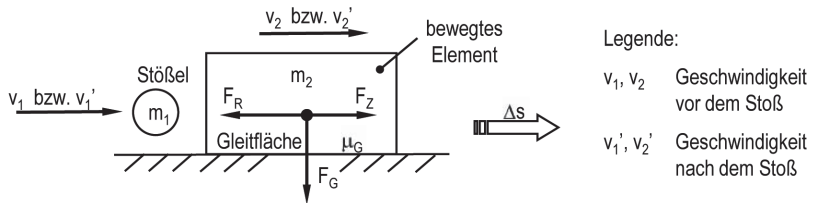


Abbildung 7-7 Stoßjustierung nach klassischer Stoßtheorie [Fran08]

- die klassische Stoßtheorie, basierend auf Impuls- und Energieerhaltungssatz,
- die quasistatische Stoßtheorie mit Berücksichtigung des elastischen Verhaltens und
- die wellenmechanische Stoßtheorie, welche eine Beschreibung über die Ausbreitung von Stoßwellen im Material liefert.

Nach [Fran08] kann bereits mit der klassischen Stoßtheorie eine ausreichend genaue Vorhersage von Impulsschrittweiten vorgenommen werden. Diese soll im Folgenden Anwendung finden, die inhaltliche Darstellung orientiert sich ebenfalls an [Fran08]. Nach der klassischen Stoßtheorie ist der Stoßprozess in zwei Phasen unterteilbar.

In der **Impulsübertragungsphase** trifft der Stößel mit Masse m_1 und der Geschwindigkeit v_1 auf das zu bewegende Element (Abbildung 7-7). Das zu bewegende Element hat die Masse m_2 und war zuvor in Ruhe ($v_2 = 0$).

In der **Bewegungsphase** wird die durch den Stoß auf das zu bewegende Element übertragene kinetische Energie innerhalb eines endlichen Zeitraums in Reibarbeit umgewandelt.

[Fran08] leitet aus Impulssatz, Energiesatz und Stoßfaktor Gl. 7-1 zur Berechnung der Schrittweite bei Stoßjustierung folgende Formel ab:

$$\Delta s = \frac{m_1^2 \cdot v_1^2 \cdot (1 + e)^2}{2 \cdot m_2 \cdot (F_G \cdot \mu_G - F_Z)} \quad \text{Gl. 7-1}$$

Dabei ist der von [Sieb00] eingeführte Stoßfaktor ein Maß für die Plastizität bzw. für den Energieverlust während des Stoßvorgangs. Nur beim vollkommen elastischen Stoß ist $e = 1$, beim teilelastischen Stoß ist $0 < e < 1$.

Neben den Größen Δs und m_2 , welche die Anforderung beschreiben, finden sich in Gl. 7-1 Größen zur Beschreibung des Stellmechanismus bzw. der Stellcharakteristik μ_g , e , F_z und zur Beschreibung des Impulsaktors v_1 und m_1 . Für μ_g , e ermittelt [Fran08] durch experimentelle Untersuchungen $\mu_g = 0,15$ und $e = 0,6$. Diese Werte sollen für die nachfolgenden, exemplarischen Betrachtungen Verwendung finden. Die Zusatzkraft F_z stellt eine von außen aufgebrachte Kraft zur Erhöhung der Impulsschrittweite dar und soll im Weiteren keine Anwendung finden. Nach [Sieb00] wird eine Stoßelaufreffgeschwindigkeit von 0,1 bis 1,2 m/s empfohlen. Die Größen zur Beschreibung des Impulsaktors sollen im Folgenden hinsichtlich einer Anwendbarkeit für die Justierung des gegebenen Prüflingsspektrums untersucht werden.

Die Diagramme in Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9 zeigen die zu erwartenden Impulsschrittweiten in Abhängigkeit von der Stoßelaufreffgeschwindigkeit sowie der Stoßel- und der Prüflingsmasse. In Abbildung 7-8 wird ersichtlich, dass die angestrebte Impulsschrittweite von $\Delta s \leq 250$ nm hinsichtlich ihrer Realisierung auch bei geringen Stoßelaufreffgeschwindigkeiten durch die geringe Prüflingsmasse eingeschränkt wird. Abbildung 7-9 zeigt zudem, dass die geräte-technisch nur begrenzt verkleinerbare Stoßelmasse als weiterer limitierender Faktor wirkt. In [Fran08] wurde weiterhin experimentell festgestellt, dass eine stoßelmassenunabhängige Mindestaufreffgeschwindigkeit existiert, bei deren Unterschreitung keine Bewegung des Prüflings mehr stattfindet. Als Begründung hierfür wird die Notwendigkeit eines Mindestimpulseintrags angeführt, welcher zur Überwindung der Haftreibung notwendig ist. Dieser Sachverhalt ist im idealisierten Berechnungsmodell nicht abgebildet, soll aber in dieser Betrachtung in Form der von Frank ermittelten minimalen Impulsschrittweite von $\Delta s = 0,05 \mu\text{m}$ Anwendung finden [Fran08]. Für die Impulsschrittweite ergibt sich damit ein nutzbarer Bereich von $0,25 \mu\text{m} \geq \Delta s \geq 0,05 \mu\text{m}$, dieser ist in den folgenden Abbildungen schraffiert dargestellt.

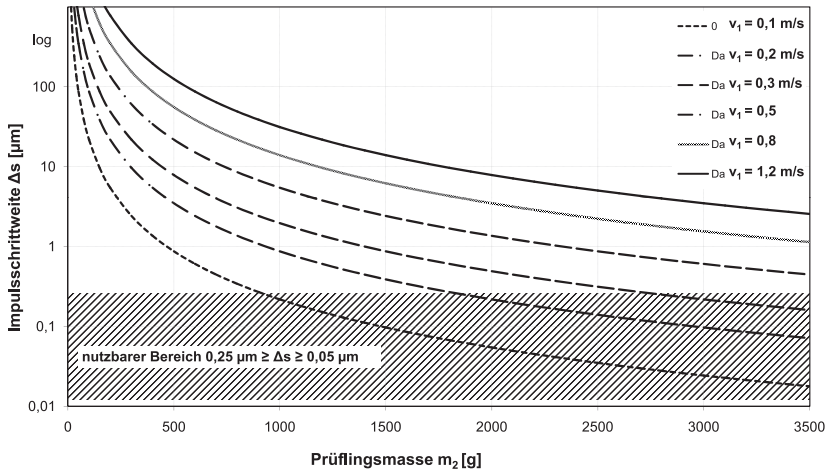


Abbildung 7-8 Stößjustierung – Impulsschrittweite in Abhängigkeit von der Prüflingsmasse m_2 und der Stößelaufreffgeschwindigkeit v_1 bei einer Stößelmasse von $m_1 = 5 \text{ g}$

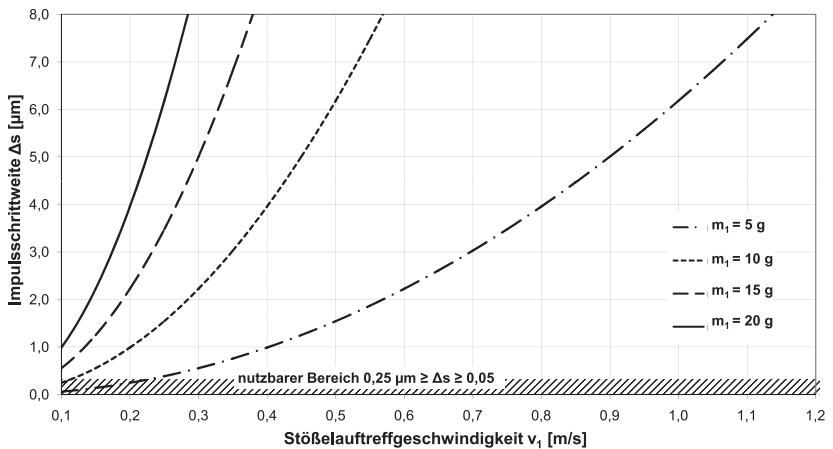


Abbildung 7-9 Stößjustierung – Impulsschrittweite in Abhängigkeit von der Stößelaufreffgeschwindigkeit v_1 und der Stößelmasse m_1 bei einer Prüflingsmasse von $m_2 = 100 \text{ g}$

Mithilfe von Gl. 7-2 lässt sich für eine zu erzielende Impulsschrittweite und für ein gegebenes Prüflingsspektrum die notwendige Stößelmasse des Impulsaktors berechnen.

$$m_1 = \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta s \cdot m_2 \cdot (F_G \cdot \mu_G - F_Z)}}{v_1 \cdot (1 + e)} \quad \text{Gl. 7-2}$$

Die sich ergebenden Stößelmassen m_1 sind in Tabelle 7-3 dargestellt und insbesondere für Prüflinge mit kleinen Massen m_2 sehr gering und gerätetechnisch nicht realisierbar.

Die durchgeführten Betrachtungen zeigen, dass eine Stoßjustierung des gegebenen Prüflingsspektrums mit der angestrebten Auflösung nur durch zusätzliche Maßnahmen realisierbar ist. Als zusätzliche Maßnahmen bieten sich zum einen die Erhöhung der Prüflingsmasse durch Auflegen eines zusätzlichen Gewichts und zum anderen die Nutzung einer Zusatzkraft F_z nach Gl. 7-1 an. In der nach Abbildung 7-7 dargestellten Vorzeichenkonvention wirkt F_z in Richtung des Stoßes und der Reibkraft entgegen. Zur Verringerung der Impulsschrittweiten muss die Zusatzkraft in Richtung der Reibkraft und dem Stoß entgegen wirken. Ob und in welcher Art und Weise Zusatzmassen bzw.

Tabelle 7-3 Stoßjustierung – maximale Stößelmassen für Impulsschrittweite $\Delta s = 250$ nm bei einer Stößelaufreffgeschwindigkeit $v_1 = 0,1$ m/s in Abhängigkeit von der Prüflingsmasse

Masse Prüfling m_2 [g]	maximale Stößelmasse m_1 [g]
50	0,3
100	0,5
250	1,3
500	2,7
1000	5,4

Zusatzkräfte ohne schädliche Rückwirkungen auf das Fassglied aufgebracht werden können, ist nicht Inhalt dieser Betrachtung und muss in weiterführenden Untersuchungen geklärt werden.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass für OHS kleiner Durchmesser die erreichbare Genauigkeit, mit der Fassglieder hinsichtlich ihrer radialen Lage zueinander angeordnet werden können, durch die Genauigkeit der Lagemanipulation im Rahmen der Justierung begrenzt wird. Für die praktische Umsetzung der Lagemanipulation durch Impulsjustierung ist die erreichbare Genauigkeit abhängig von der minimal realisierbaren Stößelmasse, der Masse des Fassgliedes und der Zusatzkraft bzw. der Zusatzmasse, die im Rahmen der Justierung aufgebracht werden kann, ohne das Fassglied zu beschädigen.

7.5.3 Toleranzbetrachtung

Um eine Aussage über das Einsatzpotenzial eines Komponentenaufbaus nach dem Stapelprinzip in OHS kleiner Durchmesser treffen zu können, wird im Folgenden eine Toleranzuntersuchung für die Zuordnung der radialen Lage durchgeführt. Basis für die Toleranzuntersuchung bilden die am justiergedrehten Fassglied erreichbaren Genauigkeiten der mechanischen Wirkflächen; dies ist in Abbildung 7-10 dargestellt.

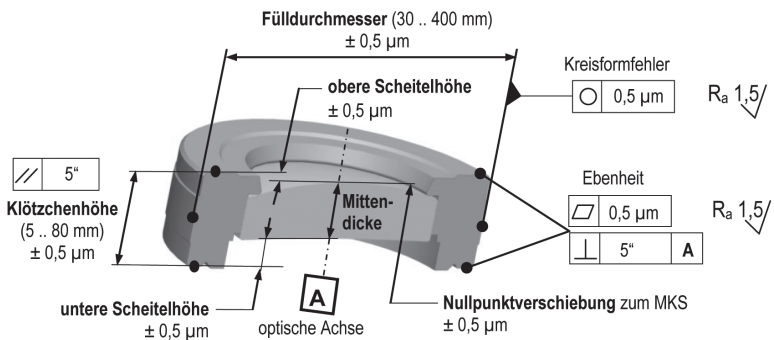


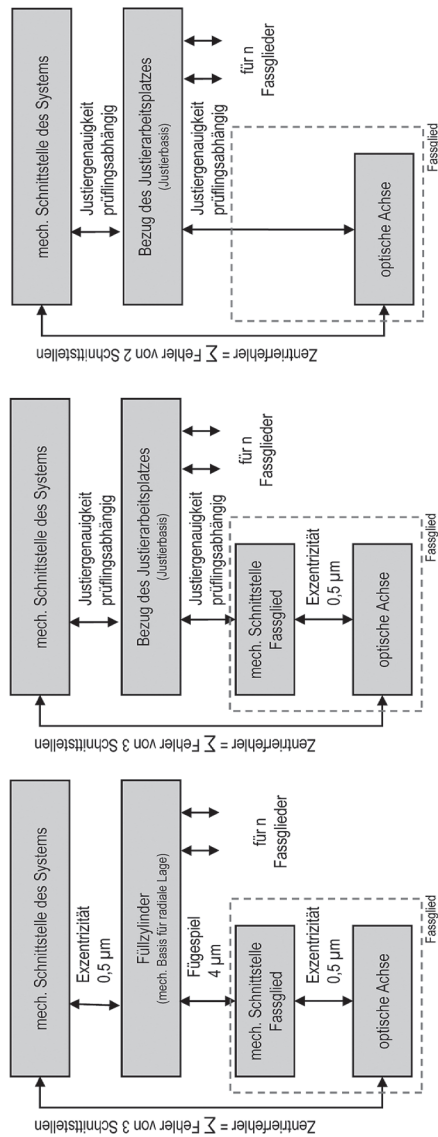
Abbildung 7-10 Zielgrößen am justiergedrehten Fassglied [Fran08]

Der Komponentenaufbau im Stapelprinzip bietet die Möglichkeit der Minimierung des Zentrierfehlers durch eine Verschiebung des Fassgliedes senkrecht zur optischen Achse. Verkippungen der optischen Achse können nicht kompensiert werden. Für die Justierung kann sowohl die im vorhergehenden Abschnitt betrachtete Messung der optischen Achse als Bezugselement dienen als auch, wie im Bereich der Lithografieoptik üblich, eine radiale mechanische Referenzfläche des Fassgliedes. Die Verwendung der optischen Achse als Bezug hat den Vorteil, dass Fehler zwischen optischer Achse und radialer Referenzfläche nicht in der Toleranzkette enthalten sind. Die sich ergebenden Toleranzketten für die radiale Lagezuordnung a) nach dem Füllfassungsprinzip, b) für die Justierung nach der radialen mechanischen Referenzfläche der Fassung und c) nach der optischen Achse des gefassten optischen Bauelementes sind in Abbildung 7-11 gegenübergestellt. Die gegebenen Toleranzketten beziehen sich auf die mechanische Schnittstelle eines optischen Systems, exemplarisch ist dies die Anschraubfläche eines Objektivs, da über diese Schnittstelle in der Regel der weitere Maßanschluss im Rahmen der Anwendung des optischen Systems erfolgt.

Grundsätzlich sind die sich ergebenden Toleranzketten für die radiale Lagezuordnung für einen Komponentenaufbau nach dem Stapelfassungsprinzip kürzer als beim Füllfassungsprinzip. Wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt, ist jedoch die erreichbare Justiergenauigkeit durch Impulsjustierung unter anderem von den Faktoren Stößelmasse, Masse des Prüflings und Vorspannkraft abhängig. Dementsprechend soll im Folgenden ein Vergleich der erreichbaren Summentoleranzen der radialen Lagezuordnung zwischen Füllfassungsprinzip und Stapelfassungsprinzip mit Justierung nach der optischen Achse vorgenommen werden. Die Berechnungsmethoden für die Ermittlung der Summentoleranzen basieren auf [Krau00]. Die als Summentoleranz T_w ermittelte Toleranz berechnet sich nach Gl. 7-3 und stellt eine wahrscheinlichkeitstheoretische Verknüpfung der Einzeltoleranzen dar.

$$T_w = \sqrt{\sum_{i=1}^m T_i^2}$$

Gl. 7-3



a) Toleranzkette für die radiale Lagezuordnung a) Füllfassung b) Stapelfassung justiert nach einer radialen mechanischen Referenzfläche c) Stapelfassung justiert nach der optischen Achse des gefassten optischen Bauelementes

Im in Abbildung 7-12 dargestellten Diagramm sind die sich ergebenden Summentoleranzen T_w in Abhängigkeit von der Prüflingsmasse gegenübergestellt. Für die Berechnung werden die grundlegenden Annahmen zu Stoßelmasse, Stoßfaktor usw. aus Kapitel 7.5.2 beibehalten. Die erreichbare Genauigkeit beim Füllfassungsprinzip ist unabhängig von der Justierung und damit von der Prüflingsmasse. Es wird sichtbar, dass das Füllfassungsprinzip nicht geeignet ist, die in Kapitel 5.3 formulierten OHS-typischen Anforderungen sicher zu erfüllen; die Ursache hierfür ist im notwendigen Fügespiel des Füllzylinders zu sehen. Der Komponentenaufbau nach dem Stapelfassungsprinzip ist in Abhängigkeit von der Prüflingsmasse und damit von der erreichbaren Justiergenauigkeit geeignet, OHS-typische Anforderungen zu erfüllen.

Unabhängig von den quantitativen Größen der für die Berechnung verwendeten Parameter wird in Abbildung 7-12 sichtbar, dass nur in einem begrenzten Prüflingsspektrum der Komponentenaufbau nach dem Stapelprinzip in Verbindung mit einer Impulsjustierung eine höhere Genauigkeit der radialen

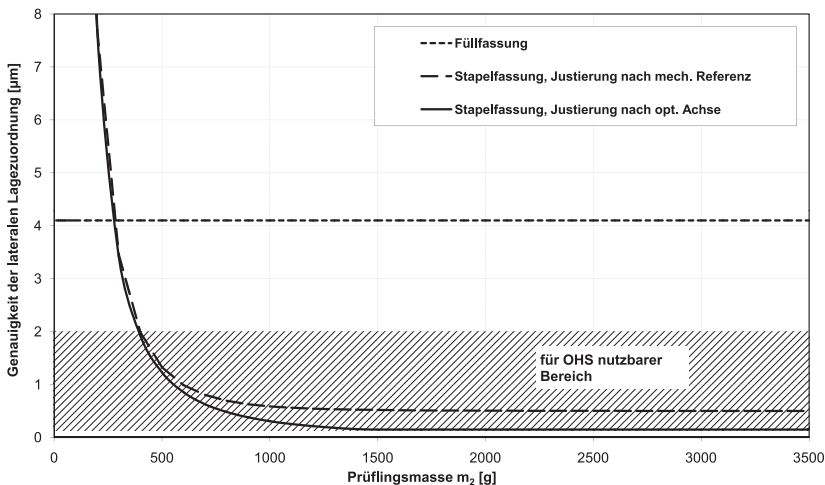


Abbildung 7-12 Summentoleranz für die radiale Lagezuordnung in Abhängigkeit von der Prüflingsmasse und der Vorspannkraft bei Impulsjustierung

Lagezuordnung ermöglicht als das zum Vergleich dienende Füllfassungsprinzip. An welcher Stelle diese Grenze liegt, lässt sich analytisch bestimmen, ist für den konkreten Anwendungsfall aber durch experimentelle Untersuchungen abzusichern.

7.5.4 Konstruktive Untersuchungen

Durch die im vorhergehenden Abschnitt getroffene Einschränkung auf das Stapelprinzip ist der mechanische Aufbau der Verbindung zum Teil schon vorgegeben. Die Lage der einzelnen Fassglieder wird über ihre axialen Fügeflächen und eine Justierung vorgegeben. Im Rahmen der konstruktiven Untersuchungen soll die Sicherung dieser Lage unter dem Gesichtspunkt der freien Einstellbarkeit der Drehlage betrachtet werden. Aufgrund dieser Forderung kommen für die Sicherung prinzipbedingt nur stoff- und kraftschlüssige Verbindungsbestandteile infrage, da diese keine lagedefinierende, sondern nur lagesichernde Eigenschaften aufweisen (vgl. Kapitel 4). Als stoffschlüssige Verfahren können hierbei Schweiß-, Löt- und Klebverfahren Anwendung finden. Der Vorteil dieser Lösungen liegt in einem einfachen Aufbau und der Vermeidung von Zwang durch zusätzliche Koppelstellen. Nachteilig ist die schlechte Demonzierbarkeit der Verbindung, welche nachfolgende Änderungsmaßnahmen im Rahmen der Systemoptimierung erschwert bzw. verhindert. Aus diesem Grund ist eine stoffschlüssige Sicherung für den allgemeinen Anwendungsfall in OHS nicht geeignet.

Für die Sicherung des Komponentenaufbaus durch kraftschlüssige Verfahren kommen Schraubverbindungen infrage. Die Verschraubung kann hierbei entsprechend Abbildung 7-4 durchgehend oder direkt zwischen benachbarten Elementen erfolgen. Eine durchgehende Verschraubung bewirkt eine Einschränkung der freien Zuordnung der Drehlage, da durch die durchgehenden Bolzen bestimmte Drehlagen bereits räumlich besetzt sind. Weiterhin besteht bei durchgehender Verschraubung die Gefahr, dass beim Stapeln und Justieren eines Fassgliedes der Justierzustand der vorhergehenden Fassglieder verloren geht, wenn dieser erst nach Abschluss der Montage aller Fassglieder gesichert wird.

Eine direkte Verschraubung zwischen benachbarten Fassgliedern ermöglicht eine Sicherung des Justierzustandes der einzelnen Fassglieder direkt nach ihrer Montage. Für spätere Änderungsmaßnahmen im Rahmen der Systemoptimierung ergibt sich die Möglichkeit, die Verschraubungen konstruktiv so anzulegen, dass das optische System nicht vollständig demontiert werden muss, sondern nur an der zu optimierenden Stelle Änderungen vorgenommen werden können. Eine freie Einstellbarkeit der Drehlage kann ebenfalls durch konstruktive Gestaltung der Schnittstelle erreicht werden. Exemplarisch hierfür sollen im Folgenden zwei Lösungen vorgestellt werden, bei denen die Verbindung unmittelbar zwischen den beteiligten Fassgliedern erfolgt. Hierzu benötigt jedes Fassglied – auf funktioneller Ebene betrachtet – zwei Schnittstellen, eine zum vorhergehenden Element und eine zum folgenden Element. Auf Gestalteebe wird jede Schnittstelle durch eine Gewindebohrung in einem Fassglied und ein Langloch im anderen Fassglied gebildet. Gewindebohrung und Langlöcher sind dabei in Teilung und Größe so angeordnet, dass sie sich gegenseitig überlagern und dadurch eine freie Zuordnung der Drehlage ermöglichen. In Abbildung 7-13 a) sind die zwei funktionellen Schnittstellen durch zwei eigenständige konstruktive Schnittstellen ausgeführt; für derartige Lösungen besteht ein erhöhter radialer Bauraumbedarf. Abbildung 7-13 b) zeigt die Ausführung der zwei funktionellen Schnittstellen in einer integrierten konstruktiven Schnittstelle. Diese wird dabei so gestaltet, dass bei jedem Fassglied Langloch und Gewindebohrung auf dem gleichen Teilkreis angeordnet sind. Um mit dieser Lösung die freie Zuordnung der Drehlage zwischen den einzelnen Fassgliedern zu gewährleisten, müssen die Langlöcher in jedem Fassglied größer als im vorhergehenden Fassglied sein. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass sie radial weniger Bauraum benötigt, jedoch ist die Anzahl der auf diese Weise direkt miteinander zu verbindenden Fassglieder durch die stetige Vergrößerung des Langlochs begrenzt. In der praktischen Umsetzung lässt sich diese Begrenzung durch geschicktes Anordnen und zusätzliche Zwischenringe, welche nur Gewindebohrungen tragen, beherrschen. Diese zusätzlichen Zwischenringe können konstruktiv so angeordnet werden, dass sie gleichzeitig als Distanzringe zur Justage von Luftabständen im Rahmen der Systemjustierung dienen können.

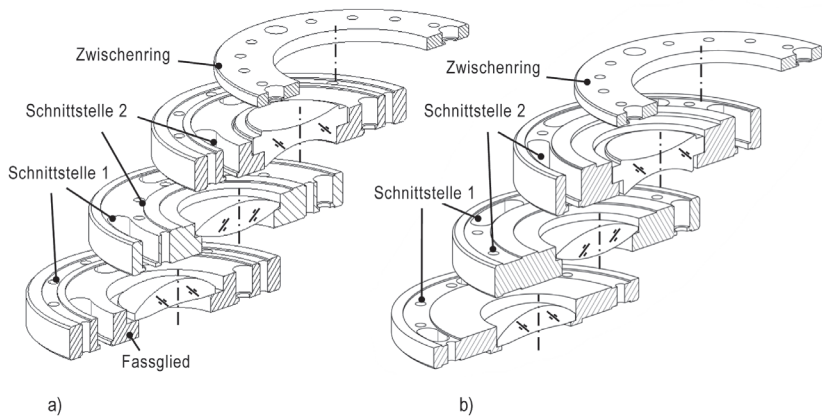


Abbildung 7-13 Aufbau Stapelfassung mit direkter Verschraubung a) zwei Schnittstellen b) integrierte Schnittstelle

Zur Realisierung der Sicherung durch zusätzliche Verschraubungen treten zu den bereits am Fassglied vorhandenen mechanischen Koppelstellen weitere Koppelstellen in Form der Verschraubung hinzu. Zur Begrenzung der entstehenden Zwangskräfte empfiehlt sich die Nutzung von zwangsfreien oder zwangsarmen Ausführungen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Sicherung des Komponentenaufbaus durch stoffschlüssige Verfahren wegen der begrenzten Demontierbarkeit in OHS nicht allgemein einsetzbar ist. Kraftschlüssige Sicherungen mit durchgehender Verschraubung sind nur einsetzbar, wenn durch zusätzliche Maßnahmen eine Sicherung des Justierzustandes während der Montage gewährleistet ist. Eine unter verschiedenen Gesichtspunkten vorteilhafte Lösung für die Sicherung ist durch eine direkte Verschraubung benachbarter Fassglieder gegeben, entstehende Überbestimmtheiten können durch konstruktive Maßnahmen beherrscht werden. Einschränkung wird für die Realisierung einer Sicherung durch Verschraubung sichtbar, dass die Schrauben als notwendige Funktionselemente mit ihrem Bauraumbedarf sowohl axial als auch radial die Miniaturisierbarkeit einschränken.

7.6 Zusammenfassung und Bewertung

Die Systemmontage hat die Aufgabe, das optische Gesamtsystem unter Verwendung von Bauteilen und Baugruppen aufzubauen und in diesem Rahmen die optischen Wirkflächen hochgenau zueinander anzuordnen; von besonderer Bedeutung hinsichtlich der Genauigkeit sind Dezentrierung und Luftabstand.

Der Luftabstand zwischen benachbarten optischen Bauelementen wird direkt durch die erreichbaren Genauigkeiten der axialen Fügeflächen des Fassglieds und bei Bedarf der verwendeten Zwischenringe bestimmt. Die in Abbildung 7-12 dargestellten Toleranzen am Fassglied sind geeignet, um die in Kapitel 5.3 dargestellten Forderungen sicher zu erfüllen.

Die erreichbare Zentriergenauigkeit ist abhängig vom verwendeten konstruktiven Aufbau. Aktuell werden OHS kleiner Durchmesser vorwiegend nach dem Füllfassungsprinzip aufgebaut. Die erreichbare Zentriergenauigkeit dieses Aufbaus wird durch das Fügspiel im Füllzylinder und durch den nur begrenzt definierten Montagezustand, der sich aufgrund von Überbestimmtheiten und Verklemmen beim Befüllen ergibt, begrenzt. Mit diesem Prinzip sind die OHS-typischen Anforderungen nicht mehr sicher zu erfüllen.

Als Alternative zum Füllfassungsprinzip wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Systemaufbau nach dem Stapelfassungsprinzip mit Impulsjustierung der radialen Lagezuordnung untersucht. Dieses Prinzip bietet grundsätzlich Vorteile hinsichtlich der erreichbaren Zentriergenauigkeit. Allgemein setzt sich die Dezentrierung eines optischen Elementes aus einer Verkippung und einem Parallelversatz zusammen. Die Verkippung beim Stapelfassungsprinzip wird direkt durch die Genauigkeiten der axialen Fügeflächen am Fassglied bestimmt und nicht durch Zwang beeinträchtigt. Die in Abbildung 7-10 dargestellten Toleranzen am Fassglied sind auch hier geeignet, um OHS-typische Anforderungen sicher zu erfüllen. Der Anteil des Parallelversatzes einer Dezentrierung entspricht einer Translation senkrecht zur optischen Achse und wird als radiale Lagezuordnung bezeichnet. Die erreichbaren Genauigkeiten der radialen Lagezuordnung werden beim Stapelfassungsprinzip mit Justierung durch die erreichbaren Genauigkeiten im Rahmen der Justierung bestimmt, hierbei wirken kleine Massen der Fassglieder begrenzend. Für ein breites Prüflingsspektrum

ist das Stapelprinzip mit Impulsjustierung jedoch geeignet, um die OHS-typischen Anforderungen zu erfüllen. Lösungen nach dem Stapelfassungsprinzip erfordern einen erhöhten Aufwand zur Realisierung einer freien Einstellbarkeit der Drehlage und sind zum einen aufgrund der Justierbarkeit und zum anderen wegen der notwendigen Verschraubungen zum Sichern des Aufbaus nur begrenzt miniaturisierbar.

Im zurückliegenden Abschnitt konnte durch den Autor gezeigt werden, dass das Füllfassungsprinzip den gestiegenen Anforderungen zum mittelbaren Fassen optischer Bauelemente in OHS nur noch bedingt gerecht wird. Anhand konstruktiver und technologischer Betrachtungen konnte belegt werden, dass ein Komponentenaufbau nach dem Stapelfassungsprinzip mit Justierung nach der optischen Achse das Potenzial hat, diese Anforderungen zu erfüllen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Angetrieben von steigenden Anforderungen an die Leistungsfähigkeit optischer Systeme ist ein stetiger Bedarf zur Weiterentwicklung ihres konstruktiven Aufbaus zu verzeichnen. Dabei hat der aktuelle Stand der Technik insbesondere bei OHS bereits ein Niveau erreicht, welches eine Weiterentwicklung nur noch durch intensive wissenschaftliche Auseinandersetzung ermöglicht. Wesentliche Elemente des konstruktiven Aufbaus optischer Systeme sind die Verbindungen optischer Bauelemente mit Fassungen und die Verbindung von Fassgliedern zu Komponenten und Systemen. Ziel dieser Arbeit ist es, für OHS kleiner Durchmesser den aktuellen Entwicklungsstand bei der Umsetzung dieser Verbindungsaufgabe darzustellen und Möglichkeiten für dessen methodische Weiterentwicklung zu erarbeiten.

Basis für die wissenschaftliche Arbeit ist die eindeutige Definition zentraler Begriffe. Hierzu wurden häufig in der Literatur verwendete Fachausdrücke herausgearbeitet und durch Definitionen präzisiert. Im Ergebnis liegen klare Begriffsdefinitionen vor, welche im Rahmen der Arbeit durchgängig Anwendung finden, aber auch wieder Eingang in die Fachliteratur finden können.

Das unmittelbare und mittelbare Fassen optischer Bauelemente wird im Wesentlichen durch die Erzeugung und Eigenschaften mechanischer Verbindungen bestimmt, deshalb haben diese für die Arbeit einen besonderen Stellenwert. Den aus der Literatur bekannten Aussagen zum grundlegenden Aufbau und zu den Eigenschaften mechanischer Verbindungen wurden differenzierte Betrachtungsweisen hinzugefügt, welche es erlauben, mechanische Verbindungen in ihre einzelnen Verbindungsbestandteile zu zerlegen. Diese Verbindungsbestandteile orientieren sich an den bisher üblichen Arten der Sicherung durch Form-, Kraft- und Stoffschluss, bieten aber die Möglichkeit einer eindeutigen Zuordnung konkreter Eigenschaften. Neben den grundsätzlichen Eigenschaften der einzelnen Verbindungsbestandteile wird ihr Zusammenwirken betrach-

tet und daraus eine allgemeingültige Darstellung der Einflussfaktoren auf die Eigenschaften fester mechanischer Verbindungen abgeleitet. Das Ergebnis dieser Betrachtungen in Form eines Modells zu Aufbau und Wirkungsweise von mechanischen Verbindungen kann als Basis für die methodische Analyse und systematische Weiterentwicklung mechanischer Verbindungen dienen. Die erfolgreiche Anwendbarkeit wird im Rahmen dieser Arbeit demonstriert.

Der Aufbau von OHS kleiner Durchmesser erfolgt in einem mehrstufigen Prozess. In Kapitel 5 wurden dieser Prozess und wesentliche Prozessschritte vorgestellt. Auf Basis dieser Darstellung wurden Thesen erarbeitet, welche die Möglichkeiten für eine systematische Weiterentwicklung aufzeigen. Exemplarisch ist hier die Ableitung einer eindeutigen Funktionstrennung zwischen unmittelbarem und mittelbarem Fassen zu nennen. Dabei hat das unmittelbare Fassen die wesentliche Aufgabe, einen Eintrag mechanischer Spannungen auf das optische Bauelement zu verhindern und dessen Lagestabilität unter Einfluss von Störgrößen zu sichern. Das mittelbare Fassen hat die Aufgabe, eine hochgenaue Anordnung der optischen Wirkflächen zueinander zu ermöglichen.

Als Ausgangspunkt für die konkrete wissenschaftliche Auseinandersetzung wurden aus der Literatur Zielgrößen für die Weiterentwicklung von unmittelbarer und mittelbarer Fassungs technik in Form von OHS-typischen Anforderungen abgeleitet. Bezug nehmend auf diese Anforderungen konnte eine allgemeingültige Formulierung für die Anforderungen an das Fassen optischer Bauelemente entsprechend Abbildung 5-3 vorgestellt werden.

Der aktuelle Entwicklungsstand der unmittelbaren Fassungs technik spiegelt sich im Wesentlichen in Veröffentlichungen in der Patentliteratur wieder. Die Breite der hierbei vorzufindenden Lösungen macht zur Charakterisierung des Standes der Technik eine geeignete Klassifizierung notwendig. Hierzu können allgemein drei Gruppen fassungs technischer Lösungen unterschieden werden. Die für OHS relevante Klasse der Einzelfertigung ist in ihrem Entwicklungsstand und den Entwicklungstendenzen an der Leistungsfähigkeit der optischen Systeme ausgerichtet und zeigt einen Trend in Richtung spannungsarmer, langzeitstabiler Fassungs techniken und Lösungen mit integrierten Manipulatoren und Aktorik. Um das breite Feld an fassungs technischen Lösungen hinsichtlich konkreter Eigenschaften objektiv analysieren und vergleichen zu können,

wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode vorgeschlagen, welche die erweiterten Betrachtungsweisen zum Aufbau mechanischer Verbindungen zur Charakterisierung nutzt. Aus der Analyse des Standes der Technik konnten mithilfe dieser Methode Ziele für die Weiterentwicklung der unmittelbaren Fassungs technik ermittelt werden. Für die konkrete Weiterentwicklung wurde ein Ansatz vorgeschlagen, welcher durch systematische Variation einen vollständigen Lösungsraum aufspannt. Die Anwendbarkeit dieses Lösungsraumes konnte anschließend am Beispiel nachgewiesen werden. Die in diesem Zusammenhang entwickelte statisch bestimmte Fassungs technik hat gezeigt, dass sie im experimentellen Funktionsnachweis OHS-typische Anforderungen sicher erfüllt. Unter den Gesichtspunkten Spannungsarmut und Lagestabilität weist sie gegenüber dem Stand der Technik deutliche Vorteile auf. Als einschränkend stellte sich im Rahmen des Funktionsnachweises jedoch die aktuell verfügbare Messtechnik heraus. Diese stößt hinsichtlich ihres Auflösungsvermögens an ihre Grenzen. Als ein für die breite Anwendung einschränkender Faktor dieser Fassungs technik wird die begrenzte Anwendbarkeit für optische Bauelemente mit kleinem verfügbaren Randbereich gesehen.

Das mittelbare Fassen hat die Aufgabe, die Lagezuordnung zwischen den gefassten optischen Bauelementen eines optischen Systems zu realisieren. In OHS finden hierfür im Wesentlichen das Füll- und das Stapelfassungsprinzip Anwendung. Beide Prinzipien wurden im Rahmen der Arbeit dargestellt und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit diskutiert. Das Füllfassungsprinzip ist für OHS kleiner Durchmesser der Stand der Technik. Dieses wird hinsichtlich der erreichbaren Zentriergenauigkeit und der Spannungsarmut durch das undefinierte Befüllen des Füllzylinders und den zwangbehafteten Aufbau limitiert. Das Stapelfassungsprinzip bietet für den Einsatz in OHS durch Wegfall des Füllzylinders deutliche Vorteile. Die erreichbare Genauigkeit dieses Prinzips wird im Wesentlichen durch die Genauigkeit, mit der sich die Lage einzelner Fassglieder im Rahmen der Systemmontage zu Justierzwecken manipulieren lässt, begrenzt. Eine differenzierte Betrachtung der Justierbarkeit wurde im Rahmen dieser Arbeit auf Basis der Impulsjustierung durchgeführt. Durch Toleranzbetrachtungen konnte dabei gezeigt werden, dass abhängig von den genauen Parametern für die Impulsjustierung eine Abgrenzung existiert, in

welcher eine Systemmontage nach Stapelprinzip in Verbindung mit Impulsjustierung höhere Genauigkeiten für die Zentrierung liefert als das Füllfassungsprinzip. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass das Stapelfassungsprinzip zum einen durch die erreichbare Justiergenauigkeit im Rahmen der Systemmontage und zum anderen durch die technischen Strukturen zur Realisierung der Verschraubung zwischen den Fassgliedern nur eingeschränkt miniaturisierbar ist.

Unter praktischen Gesichtspunkten wurde mit der vorliegenden Arbeit der aktuelle Entwicklungsstand von unmittelbarer und mittelbarer Fassungstechnik für OHS kleiner Durchmesser dargestellt. Durch methodische Analyse des Standes der Technik wurden hinsichtlich der Leistungsfähigkeit begrenzend wirkende Parameter ermittelt. Sowohl für das unmittelbare als auch für das mittelbare Fassen sind Lösungsansätze vorgestellt und deren Potenzial für die sichere Erfüllung OHS-typischer Anforderungen gezeigt worden. Die Ergebnisse dieser Arbeit können damit einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung eines DUV-Objektivs leisten, welches mit einer realisierten SR > 98 % höchsten Anforderungen gerecht wird.

Grundsätzlich lässt sich nach Abschluss dieser Arbeit feststellen, dass es für den konstruktiven Aufbau optischer Hochleistungssysteme durch die vielfältigen und unterschiedlichsten Anforderungen und Rahmenbedingungen keine allgemeingültigen funktionsfähigen Lösungen mehr gibt. Vielmehr zeichnet sich die Notwendigkeit eines grundlegenden Verständnisses der anwendbaren Konstruktionselemente sowie der technologischen Verfahren und Prozesse ab, aus dem heraus dann durch systematisches Vorgehen applikationsspezifische Lösungen entwickelt werden können. Um oben genanntes Verständnis zu befördern, wurde bei der Ausarbeitung großer Wert auf das Aufzeigen von grundsätzlichen Wirkzusammenhängen und systematischen Vorgehensweisen gelegt. Wo möglich, wurden Ergebnisse in der Art verallgemeinert, dass sie über die Arbeit und die Betrachtung von OHS hinaus Anwendung finden können. Die für die inhaltliche Bearbeitung gewählte Vorgehensweise lehnt sich eng an die Ilmenauer Schule der Konstruktionsmethodik an. Die erreichten Ergebnisse belegen deshalb auch deren grundständige Relevanz.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bieten Anknüpfungspunkte für eine Reihe von weiterführenden Aktivitäten, welche teils bereits in den betref-

fenden Abschnitten aufgezeigt wurden. Darüber hinaus wird mit steigender Abbildungsleistung eine zunehmende Diskrepanz zwischen der im Rahmen der Herstellung eingestellten Abbildungsleistung eines optischen Systems und seiner in der Applikation nutzbaren Abbildungsleistung sichtbar. Dieser Unterschied ist im Wesentlichen auf Unterschiede zwischen Herstellungs- und Betriebsbedingungen, nicht vollständig reversible Änderungen durch Transport- und Handlingoperationen und inhomogen wirkende Störgrößen im Rahmen der Applikation zurückzuführen. Aktuell sind OHS kleiner Durchmesser in der Regel passiv aufgebaut, das heißt, die geschilderten Einflüsse können nicht durch aktive Kompensationsmaßnahmen im Rahmen der Applikation minimiert werden. In der Lithografieoptik, die durch höchste Ansprüche an die Abbildungsleistung gekennzeichnet ist, ist eine aktive Optimierung der Abbildungsleistung bereits Stand der Technik. Hierzu finden gezielte Manipulationen von Form und Lage der optischen Wirkflächen statt. Dies setzt neben einem geeigneten mechanischen Design auch die Einbindung von hochentwickelter Mess- und Regelungstechnik voraus. In OHS kleiner Durchmesser sind für die aktive Manipulation von Abbildungseigenschaften im Rahmen der Applikation die wissenschaftlichen Grundlagen noch zu legen.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit konnte ein Beitrag zur systematischen Weiterentwicklung mechanischer Verbindungen, speziell für die Anwendung in optischen Hochleistungssystemen, geleistet werden. Die vorgestellten Betrachtungsweisen und Lösungsräume sind allgemein auf die Gestaltung von mechanischen Verbindungen übertragbar und bieten besonders für feinwerktechnische Anwendungen Vorteile. Hier kann ein Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten liegen.

Literaturverzeichnis

- [Baci88] Bacichm, J.: Precision Lens Mounting. United States Patent 4,733,945, United States Patent and Trademark Office, 1988.
- [Baye05] Bayern Photonics: Optische Technologien in Bayern – Kurzstudie, 2005.
- [Bans05] Banse, H.: Laserstrahllöten – Technologie zum Aufbau optischer Systeme. Dissertation. Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2005.
- [BBAO07] Beckert, E.; Burkhardt, T.; Azdasht, G.; Oppert, T.: Solder Bumping – ein neues, flexibles AVT-Verfahren für optoelektronische Systeme. Fraunhofer IOF, Annual Report, 2007.
- [BEBS05] Banse, H.; Eberhardt, R.; Beckert, E.; Stöckl, W.: Laser Beam Soldering – a New Assembly Technology for Microoptical Systems. Microoptical Systems, Microsystems Technologies 11, 2005.
- [Beck05] Beckert, E.: Ebene Keramiksubstrate und neue Montagetechnologien zum Aufbau hybrid-optischer Systeme. Dissertation. TU Ilmenau, 2005.
- [Bisch58] Bischoff, W.: Über die Arten der mechanischen Verbindung. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Elektrotechnik Ilmenau. Jahrgang 4, Heft 2. Ilmenau, 1958.
- [BKKEW99] Bauer, H.; Kraus, S.; Keck, H.; Endler, J.; Weippert, H. J.: Optikfassung mit UV-Kleber und Schutzschicht. DE 19733490 C1, Deutsches Patent- und Markenamt, 1999.
- [Blan99] Blanding, D.: Exact Constraint: Machine Design Using Kinematic Principles. New York: ASME Press, 1999.
- [Blic08] Bliedtner, J.; Gräfe, G.: Optiktechnologie. Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2008.
- [BMBF02] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Förderprogramm Optische Technologien: Optische Technologien – Made in Germany. Bonn, 2002.
- [BMBF07] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Optische Technologien – wirtschaftliche Bedeutung in Deutschland. Berlin, 2007.
- [Bold06] Boldt, A.: Halterung für eine Linse und Verfahren zum Fassen einer Linse in einer Halterung. Offenlegungsschrift DE 102004048065 C1, Deutsches Patent- und Markenamt, 2006.

- [BoPau06] Boldt, A.; Paulus, I.: Mikroskopobjektiv, Mikroskop und Verfahren zum Detektieren eines Objektes mit einem Mikroskop. Offenlegungsschrift DE 102005023972 A1, Deutsches Patent- und Markenamt, 2006.
- [Bösw90] Böswetter, G.: Montage von Rundoptikbaugruppen der Mittelklasse-optik. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 1990.
- [Brun95] Bruning, J.; DeWitt, F.; Hanford, K.: Decoupled Mount for Optical Element and Stacked Annuli Assembly. United States Patent 5,428,482, United States Patent and Trademark Office, 1995.
- [Cano06] Canon Inc., Lens Products Group: EF Lens Work 3 – EF-Objektiv-technologie. Tokyo, 2003.
- [Demu91] Demuth, T.; Mahler, F.: Verfahren und Vorrichtung zum Justieren von Linsen. Patentschrift DD 291223 A7, Deutsches Patent- und Markenamt, 1991.
- [DIN3140] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 3140 Maß und Toleranzangaben für Optikeinzelteile. Berlin: Beuth Verlag, 1998.
- [DIN8593-0] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 587722 Fertigungsverfahren Fügen, Teil 0: Allgemeines – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag, 2003.
- [DIN58722-1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 587222 Begriffe der Optikfertigung, Teil 1: Arbeitsverfahren. Berlin: Beuth Verlag, 2000.
- [DINEN923] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 923 Klebstoffe – Benennungen und Definitionen. Berlin: Beuth Verlag, 2008.
- [Dudz93] Dudzik, C., M.: The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook. Volume 4: Electro-Optical Systems Design, Analysis and Testing. Bellingham, Washington: SPIE – The International Society for Optical Engineering, 1993.
- [Ebe86] Eberhardt, V.: Ein Beitrag zur Erhöhung der Qualität des Montageprozesses von optischen Systemen. Dissertation. Friedrich Schiller Universität Jena, 1986.
- [Eco88] Eco, U.: Wie man eine wissenschaftliche Abschlussarbeit schreibt. Heidelberg: C. F. Müller, 1988.
- [EUSP10] Soemers, H.; Brouwer, D.; Culpepper, M.: Design Principles for Precision Systems. Tutorial. EUSPEN Conference 2010, Delft, 2010.
- [Fisch00] Fischer, A.: Modulare Montagetechnologie zum Ausgleich fertigungsbedingter Aberrationen von Objektiven. Dissertation. TU Ilmenau, 2000.
- [FLHH96] Fischer, A.; Leitel, A.; Hofmann, R.; Hage, K.: Selbstzentrierende Halterung für mindestens eine Linsenbaugruppe. Patentschrift DE 19623418 C2, Deutsches Patent- und Markenamt, 1996.
- [Fran08] Frank, S.: Justierdrehen – eine Montagetechnologie für Hochleistungsoptik. Dissertation. TU Ilmenau, 2008.

- [Gao83] Gao, X.: Systematik der Verbindungen – ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik. Dissertation. RWTH Aachen, 1983.
- [Gros04] Gross, H.: Inverse Probleme in der klassischen Optik. Vortrag. Waierstraß Institut für Angewandte Analysis und Stochastik, 2004. <http://www.wias-berlin.de/main/events/events/herbst04/gross.pdf>.
- [Grün85] Grünwald, F.: Fertigungsverfahren in der Gerätetechnik. München: Carl Hanser Verlag, 1985.
- [GUM08] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Berlin: Beuth Verlag, 2008.
- [Guye79] Guyenot, V.: Untersuchungen zur Beseitigung von Zentrierfehlern bei Hochleistungsobjektiven. Dissertation. Technische Universität Dresden, 1979.
- [Guye88] Guyenot, V.: Montagetechnologie von Hochleistungsobjektiven. Dissertation. Friedrich Schiller Universität Jena, 1988.
- [Habe09] Habenicht, G.: Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendung. 6., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2009.
- [Hafe02] Haferkorn, H.: Optik: physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen. 2., bearbeitete Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2002.
- [Hafe88] Haferkorn, H.: BI-Lexikon Optik. Leipzig: VEB Bibliografisches Institut Leipzig, 1988.
- [Hage83] Hage, K.: Fassungsrohr. Patentschrift DD 187581 A5, Deutsches Patent- und Markenamt, 1983.
- [Hage05] Hage, K.: Spannungsarme Optikkfassung. Offenlegungsschrift DE 10342269 A1, Deutsches Patent- und Markenamt, 2005.
- [Hage08] Hage, K.; Schaffer, D.: Optische Baugruppe und optische Komponente. Offenlegungsschrift DE 10 2006 060 088 A1, Deutsches Patent- und Markenamt, 2008.
- [Hans66] Hansen, F.: Konstruktionssystematik; Grundlagen für eine allgemeine Konstruktionslehre. Berlin: VEB Verlag Technik, 1966.
- [Hans67] Hansen, F.: Justierung. Berlin: VEB Verlag Technik, 1967.
- [Hans74] Hansen, F.: Konstruktionswissenschaft: Grundlagen und Methoden. Berlin: VEB Verlag Technik, 1974.
- [HaSl01] Hale L. C.; Slocum A. H.: Optimal design techniques for kinematic couplings. Precision Engineering, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 25, 2001.
- [Haut06] Hautz, M.: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Fassungsstrategien auf die Oberflächendeformation eingeklebter, optischer Bauelemente. Diplomarbeit. Technische Universität Ilmenau, 2006.
- [HBMSW04] Heil, J.; Bauer T.; Müller W.; Sure T., Wesner J.: New tools for high precision positioning of optical elements in high-NA microscope objec-

- tives. Hg.: Proceedings of SPIE Vol. 5252. Bellingham, Washington. The International Society for Optical Engineering, 2004.
- [HDD98] Holderer, H.; Deyhle, J.; Dietenmeier, U.: Lötverfahren für optische Materialien an Metallfassungen und gefaßte Baugruppen. Europäische Patentschrift EP0901992 B1, Europäisches Patentamt, 1998.
- [Höfe08] Höfer, S.: Azimutkennzeichnung und -detektion an Einzelteilen und Baugruppen im Prüfprozess und bei der Montage. Masterarbeit. Fachhochschule Jena, 2008.
- [Hofm02] Hofmann, J.: Heat Molding – Eine Technologie zum ungerichteten Fassen optischer Bauelemente in Kunststofffassungen. Dissertation. TU Ilmenau, 2002.
- [Höhn83] Höhne, G.: Struktursynthese und Variationstechnik beim Konstruieren. Dissertation. TU Ilmenau, 1983.
- [Höhn00] Höhne, G.: Konstruktiver Entwicklungsprozess von Geräten. In Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektrotechnik. 3., überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2000.
- [HIYK79] Hakamada; Isao; Yokohama; Kanagawa: Halbleiter Laser-Vorrichtung. Offenlegungsschrift 2900356, Deutsches Patent- und Markenamt, 1979.
- [HSAKB09] Huebel, A.; Schellhorn, U.; Arnz, M.; Klose, G.; Beyer, D.: Calibration strategies for precision stages in state-of-the-art registration metrology. PMJ Photomask Japan Conference, 2009.
- [IFW10] Horst-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung: Fügen von Werkstoffen für exemplarische Anwendungen. Jena, 2010.
<http://www.ifw-jena.de/files/10D598C1AAE/Ausgewaehlte%20Ergebnisse.pdf> (04/10)
- [ITRS07] International Technology Roadmap for Semiconductors, 2007. Edition, Executive Summary, 2007.
<http://www.itrs.net/Links/2007ITRS/ExecSum2007.pdf> (12/08)
- [Jahr03] Fähnle, O.; Wons T.; Meeder, M.: Politur und Formkorrektur optischer Bauelemente. Jahrbuch Optik und Feinmechanik. 50. Jahrgang. Berlin: Fachverlag Schiele & Schön, 2003.
- [Jahr04] Gunkel, C.; Sure, T.: Mikroskopobjektiv-Fertigung: auf dem Weg von der Mikrometerskala zur Nanotechnologie. Jahrbuch Optik und Feinmechanik. 51. Jahrgang. Berlin: Fachverlag Schiele & Schön, 2004.
- [Karo04] Karow, H. H.: Fabrication Methods for Precision Optics. New York, Wiley & Sons, 2004.
- [Katt05] Katte, H.: Automatische Messung der Restspannungen in Glas: Grundlagen und Anwendungen. Erlangen: Ilis GmbH, 2005.
- [KBAR08] Klose G.; Buttgerit U.; Arnz M.; Rosenkranz N.: High resolution and high precision pattern placement metrology for the 45 nm node and beyond. European Mask and Lithography Conference, 2008.

- [Kehr10] Kehr, S.: Konstruktion eines Azimutmesssystems. Diplomarbeit. FH Jena, 2010.
- [Krau00] Krause, W.: Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektrotechnik. 3., überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2000.
- [Krau02] Krause, W.: Grundlagen der Konstruktion – Elektronik, Elektrotechnik, Feinwerktechnik. 8. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2002.
- [Krau04] Krause, W.: Konstruktionselemente der Feinmechanik. 3., stark bearbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [Kowa78] Kowalskie, B. J.: A Users Guide to Designing and Mounting Lenses and Mirrors. Lawrence Livermore Laboratory. University of California Livermore, 1978.
- [Lehr98] Bergmann, L.; Schäfer, C.; Dorf Müller, T.; Hering, W.; Stierstadt, K.: Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd.1. Mechanik, Relativität, Wärme. 11. völlig Neubearb. Auflage. De Gruyter Verlag, 1998.
- [Lenk00] Lenkungsreis „Optische Technologien für das 21. Jahrhundert“: Deutsche Agenda optische Technologien für das 21. Jahrhundert – Potenziale, Trends und Erfordernisse. Düsseldorf, 2000.
- [Lex99] Paul, H. (Hrsg.): Lexikon der Optik. Berlin, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1999.
- [Litf01] Litfin, G.: Technische Optik in der Praxis. 2., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2001.
- [Mare47] Marechal, A.: Etude des effets combines de la diffraction et des aberrations geometriques sur l’image d’un point lumineux. Revue d’Optique 26. pp. 257–27, 1947.
- [MBOR05] Manke, I.; Becker, K. F.; Ostmann, A.; Reichl, H.: Verfahren zur Erzeugung von Verbindungen in der Mikroelektronik. Patentschrift DE 10334391 B4, Deutsches Patent- und Markenamt, 2005.
- [Merk98] Merkel, H.: Wirtschaftliche Betrachtung technologischer Zusammenhänge bei der Montage optischer Bauelemente. Diplomarbeit. Technische Universität Ilmenau, 1998.
- [MOOR65] Moore, Gordon E.: Cramming more components onto integrated circuits. Electronics. 1965, Volume 38, Number 8.
- [Mooz07] Mooz, D.: Spannungsarme Fassungen von Linsen kleiner Durchmesser. Projektarbeit. Technische Universität Ilmenau, 2007.
- [Naum92] Naumann, H.; Schröder G.: Bauelemente der Optik: Taschenbuch technischer Optik. 6., neubearbeitete Auflage. München, Wien: Hanser Verlag, 1992.
- [Oshi03] Oshino, T.; Okuyama, T.: Optical Element Mountings Exhibiting Reduced Deformation of Optical Elements Held Thereby. Patent Application Publication US2003/0234989 A, United States Patent and Trademark Office, 2003.

- [PaBe07] Pahl G.; Beitz W.: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2007.
- [Photo09] Initiative Photonik 2020: Licht ist Zukunft, Memorandum zur Zukunft der optischen Technologien in Deutschland. 2009.
- [Photo10] Photonics 21: Lighting the way ahead, Photonics21 Strategic Research Agenda. VDI Technologiezentrum, 2010.
- [PBSSLT07] Perlitz S.; Buttgereit U.; Scherübel T.; Seidel T.; Lee K.; Tavassoli M.: Novel solution for in die phase control under scanner equivalent optical settings for 45 nm node and below. PMJ Photomask Japan Conference, 2007.
- [PSGG01] Pröger-Mühleck, R.; Schinköthe, W.; Guyenot, V.; Gebhardt, A.; Siebenhaar, C.: Aerostatisch gelagerter Impulsantrieb zur Präzisionsjustage in der Mikrotechnik. GMM-IMM-Fachtagung, Mainz 2001.
- [Rauc83] Rauch, M.; Bürger, E.: Mechanische Schaltsysteme. Verlag Technik Berlin, 1983.
- [Sche00] Scheller, T.: Untersuchungen zu automatisierten Montageprozessen hybrider mikrooptischer Systeme. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 2000.
- [Schl01] Schletterer, T.: Elastische Linsenträger. Patentschrift DE 10043344 C2, Deutsches Patent- und Markenamt, 2001.
- [Schl02] Schletterer, T.: Spannungsarme Linsenfassung. Patentschrift DE 10139805 C1, Deutsches Patent- und Markenamt, 2002.
- [Schl08] Schletterer, T.: Lateral verstellbare Fassung für optische Elemente. Patentschrift DE 102007030579B4, Deutsches Patent- und Markenamt, 2008.
- [SBHW05] Sure T.; Bauer T.; Heil, J.; Wesner J.: DUV Microscope Objectives: technology driver that forces the production to switch from the micrometer scale to the nanometer scale. Hg.: Proceedings of SPIE Vol. 5965. Bellingham, Washington. The International Society for Optical Engineering, 2005.
- [Schl82] Schilling, M.: Konstruktionsprinzipien der Gerätetechnik. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 1982.
- [Schr02] Schröder, G.; Treiber, H.: Technische Optik. 9. Auflage. Würzburg: Vogel Verlag, 2002.
- [Schu03] Schubert I.; Müller E.; Reichelt G.; Wagner B.: Werkstoffe und Verfahren der Optikfertigung. Jena: Schott-Zeiss-Bildungszentrum gGmbH, 2003.
- [Sieb00] Siebenhaar, C.: Präzisionsjustieren durch Einleitung von mechanischen Impulsen. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 2000, veröffentlicht in Fortschritt-Berichte VDI Nr. 340.

- [Sieb04] Siebenhaar, C.: Precise adjustment method using stroke impulse and friction. Precision Engineering, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 28, pp. 194–203, 2004.
- [Sloc92a] Slocum, A. H.: Design of three-groove kinematic couplings. Precision Engineering, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 14, 1992.
- [Sloc92b] Slocum, A. H.: Precision Machine Design. Society of Manufacturing Engineers. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
- [SMS06] Carl Zeiss SMS GmbH: Perfectly adapted to new challenges, Zeiss AIMS 45–193i. Produktbeschreibung AIMS45-193, Version 09-06. Oberkochen, Carl Zeiss SMT, 2006.
- [SMT08] Carl Zeiss SMT AG: Optical Element Unit and Method of supporting an optical Element. Patentschrift EP 19011101 A1, Europäisches Patentamt, 2008.
- [SoThe08] Sondermann, M.; Theska, R.: Microscope Objectives for Semiconductor Metrology: Technology Driver for the Mounting Technology of Optical High Performance Systems with Small Diameters. Proceedings of IWK 53th annual meeting, 2008.
- [Sper82] Sperlich, H.: Das Gestalten im Konstruktionsprozess. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 1982.
- [Stre04] Stressarme Montage von Sensoren und Mikrooptik-Komponenten mittels Mikroklebetechniken. Abschlussbericht zum AIF Forschungsvorhaben Nr.13.361 N/DVS 10.031. Laufzeit 01.08.2002–31.12.2004.
- [Sure06] Sure, T.: Automatisierte Höchstpräzisions-Fertigungstechnologie für Mikrooptik-Baugruppen. Forschungsbericht. wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 96, 2006.
- [TaHo08] Tayebati, P.; Holderer, H.: Verfahren zur Herstellung einer Lötverbindung und optischen Baugruppe. Offenlegungsschrift DE 10 2007 004 185 A1, Deutsches Patent- und Markenamt, 2008.
- [Thes03] Theska, R.: Fassen optischer Bauelemente. Lehrblätter zur Lehrveranstaltung „Gerätekonstruktion“. Technische Universität Ilmenau, 2003.
- [Trio09] Trioptics GmbH: Opti Centrik – Kontrollieren, Ausrichten, Kitten, Kleben und Aufbau von Optiken. Verkaufsprospekt, 2009.
- [TUI03] Technische Universität Ilmenau: Lehrbrief Grundlagen der Produktentwicklung. Lehrblätter des Fachbereichs Konstruktionstechnik. TU Ilmenau, 2003.
- [Ullm09] Ullmann, V.: Entwicklung einer motorischen Hilfsfassung zur Ionenstrahlbearbeitung kleiner Linsen. Bachelorarbeit. Technische Universität Ilmenau, 2009.

-
- [WeHo06] Weber, U.; Holderer, H.: Halte- und Positioniervorrichtung für ein optisches Element. Patentschrift DE 10344178B4, Deutsches Patent- und Markenamt, 2006.
- [VDI2222] Verein Deutscher Ingenieure: Konstruktionsmethodik; Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen. VDI 2222 Blatt 2, Berlin: Beuth Verlag, 1982.
- [VDI2251-3] Verein Deutscher Ingenieure, Verband Deutscher Elektrotechniker: Feinwerkelemente Lötverbindungen. VDI/VDE 2251 Blatt 3. Berlin: Beuth Verlag, 1998.
- [Vuko97] Vukobratovitch, D.: Optomechanical design principles, in: Handbook of Optomechanical Engineering. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [Yod05] Yoder, P.R.: Optomechanical Systems Design. Bellingham, Washington: SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2005.
- [Yod08] Yoder, P.R.: Mounting Optics in Optical Instruments. Bellingham, Washington: SPIE –The International Society for Optical Engineering, 2008.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1	Mittelbares, unmittelbares Fassen	7
Abbildung 3-2	Prozesskette der Herstellung optischer Systeme	8
Abbildung 3-3	Einordnung der Begriffe Schnittstelle, Koppelstelle und Wirkflächen	9
Abbildung 4-1	Unfreiheiten u von Wirkflächenkombinationen [Schil82], [Krau00]	18
Abbildung 4-2	Mechanische Lagedefinition in sechs Freiheiten für ein Prisma a) zwangsfreie Ausführung durch Koppelstellen mit Punktberührung b) zwangarme Ausführung durch definierte Flächenberührung [Yod05]	20
Abbildung 4-3	a) Koppelstelle Kugel – V-Nut b) Kräfteplan	21
Abbildung 4-4	Freiheiten in mechanischen Koppelstellen a) durch Wirkflächenkontakt b) durch Festkörpergelenke[EUSP10]	23
Abbildung 4-5	Wirkungsweise kraftschlüssiger Verbindungsbestandteile	25
Abbildung 4-6	Wirkungsweise sichernder Verbindungsbestandteile in Abhängigkeit von der Temperatur a) Sicherung als Kombination aus kraft- und formschlüssigen Verbindungsbestandteilen b) Sicherung durch formschlüssige Verbindungsbestandteile c) Sicherung durch stoffschlüssige Verbindungsbestandteile	29
Abbildung 5-1	Prozesskette der Herstellung und Applikation von OHS	33
Abbildung 5-2	Referenzierung des optischen Bauelementes im optischen System a) ohne Justierdrehen b) mit Justierdrehen	35
Abbildung 5-3	Qualitative Anforderungen an das unmittelbare und mittelbare Fassen	43
Abbildung 6-1	Hierarchische Struktur der Zusammenhänge von Fassungstechniken der Rundoptik [Merk98]	47
Abbildung 6-2	a) Methode zur Analyse von mechanischen Verbindungen b) Fassung mittels Vorschraubring	48
Abbildung 6-3	Fassglied geklebt a) konstruktiver Aufbau b) schematische Wirkungsweise	54
Abbildung 6-4	Schematischer Aufbau des Lösungsraumes für die Gestaltung mechanischer Verbindungen	58
Abbildung 6-5	Vorgehensweise bei der systematischen Untersuchung von Koppelstellen zur Gestaltung mechanischer Verbindungen	59
Abbildung 6-6	Allgemeines Wirkschema für den Einfluss von Störgrößen	61

Abbildung 6-7	Wirkschema und Einflussfaktoren in Klebeverbindungen	66
Abbildung 6-8	Wirkschema für den Einfluss von Störgrößen auf Klebeverbindungen beim Fassen optischer Bauelemente	67
Abbildung 6-9	Weiterleitung von Normalkräften a) Elastischer Linsenträger [Schle01] b) Fassung mittels Vorschraubring [Yod08] c) Fassung durch Klemmen	74
Abbildung 6-10	Weiterleitung von Zugkräften durch Kleberschrumpfung a) Ringklebung b) Klebung axial auf Ringschneide c) Klebung mit Festpunkt-Lospunkt-Anordnung	75
Abbildung 6-11	Sicherung der Fügerichtung a) ohne Sicherung b) Sicherung zwangarm c) Sicherung zwangfrei	77
Abbildung 6-12	Fassung in elastischer Bauweise: a) Ausführung nach [Dudz93] b) Ausführung nach [Hage09]	79
Abbildung 6-13	Funktionsprinzip – Fassung in elastischer Ausführung	80
Abbildung 6-14	Anordnung Kugel – Kugelpfanne	86
Abbildung 6-15	Schematische Darstellung der Anordnungen mit $F = 0$ und axialer Fügerichtung a) $3 \times$ Koppelstelle Kugel – V-Nut b) $1 \times$ Koppelstelle Kugel – Kegel, $1 \times$ Koppelstelle Kugel – V-Nut, $1 \times$ Koppelstelle Kugel – Ebene	88
Abbildung 6-16	Schematische Darstellung der Anordnungen mit $F = 0$ und gesperrter Fügerichtung a) $3 \times$ Koppelstelle Kugel – V-Nut – Sicherung zwangarm b) $1 \times$ Koppelstelle Kugel – Kegel, $1 \times$ Koppelstelle Kugel – V-Nut, $1 \times$ Koppelstelle Kugel – Ebene – Sicherung zwangfrei	89
Abbildung 6-17	V-Nut a) schematischer Aufbau b) freigeschnittenes System c) Kräfteplan	92
Abbildung 6-18	Kugel – V-Nut bei Auslenkung a) schematischer Aufbau b) freigeschnittenes System c) Kräfteplan	94
Abbildung 6-19	Selbsteinstellung Kugel – V-Nut bei Volumenänderung a) schematischer Aufbau b) freigeschnittenes System c) Kräfteplan – linkes Schnittufer	95
Abbildung 6-20	Statisch bestimmte Fassungstechnik – Konstruktionsentwurf	98
Abbildung 6-21	Spannungszustand und Deformation des optischen Bauelementes bei verschiedenen Vorspannkräften	99
Abbildung 6-22	Spannungszustand und Deformation des optischen Bauelementes in Abhängigkeit vom Kraftangriffspunkt der Vorspannkraft ($3 \times F = 3,3 \text{ N}$)	100
Abbildung 6-23	Prüfschema zur Charakterisierung von gefassten optischen Bauelementen	102
Abbildung 6-24	Versuchsmuster 1, interferometrische Darstellung der optischen Wirkfläche nach verschiedenen Prozessschritten a) Ausgangszustand b) Optik gefasst c) nach Transporttest – Beschleunigung	104

Abbildung 6-25	Muster 1, Passfehler nach verschiedenen Prozessschritten	104
Abbildung 6-26	Muster 2, Passfehler nach verschiedenen Prozessschritten	105
Abbildung 6-27	Muster 3, Passfehler nach verschiedenen Prozessschritten	105
Abbildung 6-28	Versuchsmuster 1, Spannungsdoppelbrechung nach verschiedenen Prozessschritten	106
Abbildung 6-29	Versuchsmuster 1, Spannungsdoppelbrechung nach verschiedenen Prozessschritten	107
Abbildung 7-1	Füllfassung, schematischer Aufbau	113
Abbildung 7-2	Überlagerung der Fehler axialer Schnittstellen in mehrgliedrigen optischen Systemen a) allgemein beim Stapeln b) Füllfassungsprinzip	115
Abbildung 7-3	Elemente zur systematischen Erarbeitung eines Lösungsraumes für die Montage mehrgliedriger optischer Systeme a) Lagezuordnung zwischen den Fassgliedern b) Anordnung mechanischer Koppelstellen	118
Abbildung 7-4	Schematischer Aufbau nach dem Stapelfassungsprinzip a) mit durchgehender Verschraubung [Fran08] b) bei direkter Verschraubung	120
Abbildung 7-5	Allgemeiner Justierkreis für die Justierung eines optischen Systems	121
Abbildung 7-6	Justierung eines Fadenkreuzes [Thes03]	124
Abbildung 7-7	Stoßjustierung nach klassischer Stoßtheorie [Fran08]	127
Abbildung 7-8	Stoßjustierung – Impulsschrittweite in Abhängigkeit von der Prüflingsmasse m_2 und der Stoßelaufreffgeschwindigkeit v_1 bei einer Stoßelmasse von $m_1 = 5 \text{ g}$	129
Abbildung 7-9	Stoßjustierung – Impulsschrittweite in Abhängigkeit von der Stoßelaufreffgeschwindigkeit v_1 und der Stoßelmasse m_1 bei einer Prüflingsmasse von $m_2 = 100 \text{ g}$	129
Abbildung 7-10	Zielgrößen am justiergedrehten Fassglied [Fran08]	131
Abbildung 7-11	Toleranzkette für die radiale Lagezuordnung a) Füllfassung b) Stapelfassung justiert nach einer radialen mechanischen Referenzfläche c) Stapelfassung justiert nach der optischen Achse des gefassten optischen Bauelementes	133
Abbildung 7-12	Summentoleranz für die radiale Lagezuordnung in Abhängigkeit von der Prüflingsmasse und der Vorspannkraft bei Impulsjustierung	134
Abbildung 7-13	Aufbau Stapelfassung mit direkter Verschraubung a) zwei Schnittstellen b) integrierte Schnittstelle	137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Klassifizierung optischer Systeme nach Genauigkeitsklassen [Fran08]	10
Tabelle 6-1	Fassung mittels Vorschraubring	49
Tabelle 6-2	Fassung mittels Vorschraubring	50
Tabelle 6-3	Fassung mittels Vorschraubring	51
Tabelle 6-4	Analyse – geklebte Fassungstechnologie	55
Tabelle 6-4	Analyse – geklebte Fassungstechnologie (Fortsetzung)	56
Tabelle 6-5	Problemfelder beim unmittelbaren Fassen optischer Bauelemente in OHS	73
Tabelle 6-6	Prüfpunkte und zugehörige Prüfkriterien zur Charakterisierung gefasster optischer Bauelemente	103
Tabelle 6-7	Versuchsmuster 1, Zentrierzustand nach verschiedenen Prozessschritten	108
Tabelle 7-1	Füllfassungsprinzip, Analyse der Koppelstellen	114
Tabelle 7-2	Übersicht – Verfahren zur Zentriermessung	123
Tabelle 7-3	Stoßjustierung – maximale Stößelmassen für Impulsschrittweite $\Delta s = 250 \text{ nm}$ bei einer Stößelauftrittsgeschwindigkeit $v_1 = 0,1 \text{ m/s}$ in Abhängigkeit von der Prüflingsmasse	130

Sachwortverzeichnis

A

Anordnung 8
Antrieb
 durch Stoß 125
 kontinuierlich 124
axiale Lage 111

B

Berührung
 flächenförmig 19
 linienförmig 19
 punktförmig 19

D

Dezentrierung 41
Drehlage 111
Druckbereich 43
Durchlichtverfahren 122

E

Einsatzbedingungen 37
Einzelfertigung 46

F

Fassen 6
 durch Kleben 53
 mittelbares 6, 34
 mittels Vorschraubring 49
 unmittelbares 6
Fassglied 6
Fassung 7
Fassungstechnik
 mittelbare 7
 unmittelbare 7, 45
Fehlerminimierung
 Prinzip der 78

Festkörpergelenk 79
Freiheit 14
Freiheitsgrad 14
Fügebereich 20
Fügen 17
Fügerichtung 20
Füllfassungsprinzip 36, 112
Füllstoffe 27

G

Genauigkeit
 der Lagezuordnung 42

I

Impulsjustierung 126
 Bewegungsphase 127
Impulsübertragungsphase 127

J

Justierdrehen 34
Justierkreis 121

K

Kleben 27, 64
Klebstoff 27
 Empfindlichkeit 67
Kombinationsrechnung 36
Kompensation
 Prinzip der 83
Koppelstellen 8
Kraftleitung 73

L

Lage
 ermitteln 122

Lage des Fassgliedes
manipulieren 122

Lagezuordnung
Kiplage 112
lateral 111
radial 112

Linienberührung 19

Löten 68

Luftabstand 111

Luftabstandsabweichung 41

Luftfeuchtigkeit 43

M

Massenproduktion 45

mechanische Verbindung
fest 14

Methode 49

O

optische Achse 41

optisches Hochleistungsbaulement 9

optisches Hochleistungssystem 9

optisches System 7

P

Paarung 17

Passfehler 10, 41

R

Reflexbildverfahren 122

S

Schnittstelle 8

Schock 43

Serienproduktion 46

Spannungen
mechanisch 65

Spannungsarmut 41

Spannungsdoppelbrechung 42

Stapelfassung 119

Stellgrößen
ableiten 122

Stick-Slip-Effekt 125

Stoßantrieb 125

Strehlsche Definitionshelligkeit 10

Struktur 40

System 40

Systemmontage 36

Systemprüfung 36

T

Temperaturbereich 43

Transportbedingungen 37

U

Überbestimmtheit 15

vermeiden 76

Unfreiheit 14

V

Verbindungsbestandteile

formschlüssig 26

kraftschlüssig 24

stoffschlüssig 26

Verkippung 41

W

Wellenfrontauswertung 123

Wirkflächen 8

Wirkschema

allgemein 61

in Klebeverbindungen 65

Z

Zentrierfühlhebel 122

Zentriermessung

interferometrische 123

Zentrierung 111

Zwang 15

zwangarm 16

Anhang A

Prozessschritt	Pkt.	Beschreibung	Untersuchungsbedingungen
Herstellung	1	Außendurchmesser der Optikteile	entfällt
		geometrische Größen der Mechanikteile	entfällt
		Passes nach Herstellung der opt. Grundteile	22°C ± 0,5 °C
		SDB nach Herstellung der opt. Grundteile	22°C ± 0,5 °C
	2	Passes nach Herstellung der Nuten	22°C ± 0,5 °C
		SDB nach Herstellung der Nuten	22°C ± 0,5 °C
	3	SDB mit verschiedenen Vorspannkräften	22°C ± 0,5 °C
		Passes nach Sicherung in Fassung	22°C ± 0,5 °C
		SDB nach Sicherung in Fassung	22°C ± 0,5 °C
	4	geometrischen Größen (KMP Ablage, Scheitelhöhen, Axial-, Radialschlag) nach Justierdrehen	22°C ± 0,5 °C
		Passes nach Justierdrehen	22°C ± 0,5 °C
		SDB nach Justierdrehen	22°C ± 0,5 °C
Applikation	5 + 6	Klimatest	Rampe von 10 °C auf 60 °C mit 2 K/h, auf 10°C und 60°C 30 min halten, Luftfeuchte konstant 40%, 2 Zyklen
		geometrischen Größen (KMP Ablage, Scheitelhöhen, Axial-, Radialschlag) nach Klimatest	22°C ± 0,5 °C
		Passes nach Klimatest	22°C ± 0,5 °C
		SDB nach Klimatest	22°C ± 0,5 °C
		Transporttest	Schock in 3 Achsen mit je zwei Richtungen, radial (horizontal) mit 10g/8 ms, axial (vertikal) mit 10g/8ms. 1000 Wiederholungen pro Achse und Richtung
		geometrischen Größen (KMP Ablage, Scheitelhöhen, Axial-, Radialschlag) nach Transporttest	22°C ± 0,5 °C
		Passes nach Transporttest	22°C ± 0,5 °C
		SDB nach Transporttest	22°C ± 0,5 °C

Liste der bisher erschienenen Bände, Stand 31.01.2011

Bericht aus dem Institut für Maschinenelemente und Konstruktion (IMK), 1990 – 2010

- Band 1 Institut für Maschinenelemente und Konstruktion der TU Ilmenau (Hrsg.):**
Forschung und Lehre im Institut für Maschinenelemente und Konstruktion
(Institutsbericht)
Ilmenau : ISLE, 1999. - ISBN 3-932633-37-7
- Band 2 Spiller, Frank:**
Möglichkeiten der rechentechnischen Umsetzung von Erkenntnissen aus der Konstruktions-systematik unter Nutzung der Featuretechnologie
(Dissertation TU Ilmenau 1998)
Ilmenau : ISLE, 1998. - ISBN 3-932633-20-2
- Band 3 Leibl, Peter:**
Entwicklung eines featureorientierten Hilfsmittels für die Konstruktion kostengünstiger Produkte
(Dissertation TU Ilmenau 1998)
Ilmenau : ISLE, 1998. - ISBN 3-00-003695-4
- Band 4 Lutz, Steffen:**
Kennlinie und Eigenfrequenzen von Schraubenfedern
(Dissertation TU Ilmenau 2000)
Ilmenau : ISLE, 2000. - ISBN 3-932633-47-4
- Band 5 Kletzin, Ulf:**
Finite-Elemente-basiertes Entwurfssystem für Federn und Federanforderungen
(Dissertation TU Ilmenau 2000)
Ilmenau : ISLE, 2000. - ISBN 3-932633-48-2
- Band 6 Volz, Andreas K.:**
Systemorientierter Karosserie-Konzeptentwurf am Beispiel der Crashesimulation
(Dissertation TU Ilmenau 1998)
Ilmenau : ISLE, 2000. - ISBN 3-932633-52-0
- Band 7 Brix, Torsten:**
Feature- und constraint-basierter Entwurf technischer Prinzipie
(Dissertation TU Ilmenau 2001)
Ilmenau : ISLE, 2001. - ISBN 3-932633-67-9

- Band 8 Rektor der TU Ilmenau und Institut für Maschinenelemente und Konstruktion der TU Ilmenau (Hrsg.) in Zusammenarbeit mit Carl Zeiss Jena GmbH**
Vom Arbeitsblatt zum virtuellen Prototyp – 50 Jahre
Konstruktionssystematik
(Institutsbericht)
Ilmenau : ISLE, 2002. - ISBN 3-932633-68-7
- Band 9 Liebermann, Kersten:**
Rechnergestütztes Entwurfs- und Optimierungssystem für
Schraubendruckfedern
(Dissertation TU Ilmenau 2003)
Ilmenau : ISLE, 2003. - ISBN 3-932633-74-1
- Band 10 Meissner, Manfred; Denecke, Klaus:**
Die Geschichte der Maschinenelemente als Fachgebiet und Institut an der
Technischen Universität Ilmenau von 1953 bis 2003
(Institutsbericht)
Ilmenau : ISLE, 2003. - ISBN 3-932633-82-2
- Band 11 Geinitz, Veronika:**
Genauigkeits- und auslastungsoptimierte Schraubendruckfedern
(Dissertation TU Ilmenau 2006)
Ilmenau : ISLE, 2006. - ISBN 3-938843-11-X
- Band 12 Institut für Maschinenelemente und Konstruktion (Hrsg.):**
Festschrift zum Ehrenkolloquium anlässlich der Emeritierungen von
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Günter Höhne und Univ.-Prof. Dr.-Ing.
habil. Hans-Jürgen Schorcht
(Institutsbericht)
Ilmenau : ISLE, 2005. - ISBN 3-932633-97-0
- Band 13 Wittkopp, Tobias:**
Mehrkörpersimulation von Schraubendruckfedern
(Dissertation TU Ilmenau 2005)
Ilmenau : ISLE, 2005. - ISBN 3-938843-07-1
- Band 14 Frank, Stefan:**
Justierdrehen – eine Technologie für Hochleistungsoptik
(Dissertation TU Ilmenau 2007)
Ilmenau : ISLE, 2008. - ISBN 978-3-938843-35-4
- Band 15 Schilling, Thomas:**
Augmented Reality in der Produktentstehung
(Dissertation TU Ilmenau 2008)
Ilmenau : ISLE, 2008. - ISBN 978-3-938843-42-0

Band 16 Lotz, Markus:

Konstruktion von Messspiegeln hochgenauer Mess- und Positioniermaschinen

(Dissertation TU Ilmenau 2009)

Ilmenau : ISLE, 2009. - ISBN 978-3-938843-46-8

[Band 17] Hackel, Tobias:

Grundlegende Untersuchungen zu vertikalen Positioniersystemen für Nanopräzisionsmaschinen

(Dissertation TU Ilmenau 2010)

Münster, Westf : Monsenstein und Vannerdat, 2010. - ISBN 978-3-86991-111-3

[Band 18] Frank, Thomas:

Konzeption und konstruktive Gestaltung der Messkreise von Nanomessmaschinen

(Dissertation TU Ilmenau 2010)

Münster, Westf : Monsenstein und Vannerdat, 2010. - ISBN 978-3-86991-194-6

Berichte aus dem Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK), 2010 - ...

Band 19 Sondermann, Mario:

Mechanische Verbindungen zum Aufbau optischer Hochleistungssysteme (Dissertation TU Ilmenau 2010)

Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2011. - ISBN 978-3-939473-94-7